

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Optimalizace přímého odporového ohřevu

Optimisation of Direct Resistance Heating

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Suška**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Optimalizace přímého odporového ohřevu
Optimisation of Direct Resistance Heating

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor problematiky odporového ohřevu, přímý odporový ohřev, metody výpočtů
2. Možnosti řešení výpočtovými programy
3. Volba parametrů optimalizace, volba parametrů vsázky
4. Měření na laboratorním modelu
5. Zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Hradílek, Z.: Elektrické teplo. Skriptum VŠB-TU Ostrava 1996.
- [2] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2001.
- [3] Rada, J. a kol.: Elektrotepelná technika, SNTL 1985.
- [4] Hering, M.: Podstawy elektrotermii, cz.I. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warszawa 1998.
- [5] Kreidl, M.: Měření teploty - senzory a měřicí obvody, BEN Praha 2005.
- [6] Manuály k PC měřicím kartám (PCL, PCA) a převodníkům.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

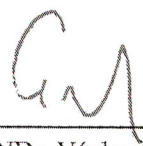
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Král, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Královi Ph.D za jeho podporu a pomoc při sestavování
této diplomové práce.



.....
Miroslav Suška

V Ostravě 4. května 2012

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na měření parametrů kovových tyčí při přímém odporovém ohřevu. Jejím cílem je provést rozbor optimalizace přímého odporového ohřevu pomocí zvolených parametrů. K tomuto měření byl využit laboratorní model. Pro zpracování velkého množství dat a provedení výpočtů bylo využito výpočetní techniky. Získané výsledky slouží k lepšímu porozumění principů, které ovlivňují přímý odporový ohřev.

Klíčová slova

Přímý odporový ohřev, elektrické teplo, optimalizace přímého odporového ohřevu, měření teploty, senzory pro měření teploty, výpočtový program, experimentální měření

Abstract

Diploma thesis is focused on measurement parameters of metallic poles at direct resistance heating. Its goal is to perform analysis of optimization of direct resistance heating using selected parameters. Laboratory model was used for the measurement. Computing was used to process huge amounts of data and calculations. Obtained results are to be used for better understanding of principles affecting the direct resistance heating.

Keywords

Direct resistance heating, electric heating, optimization of direct resistance heating, temperature measurement, temperature measurement sensors, evaluating program, experimental measurement

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Název	Jednotka
Bi	Biotovo kritérium	[-]
C1, C2	radiační konstanty Planckova zákona	$[W \cdot m^2]$
E	úhrnná zářivost	$[W \cdot m^{-2}]$
$E_{\tilde{c}}$	úhrnná zářivost černého povrchu	$[W \cdot m^{-2}]$
$E_{\tilde{s}}$	úhrnná zářivost šedého povrchu	$[W \cdot m^{-2}]$
E_{λ}	spektrální zářivost	$[W \cdot m^{-3}]$
$E_{\lambda\tilde{c}}$	spektrální zářivost černého povrchu	$[W \cdot m^{-3}]$
$E_{\lambda\tilde{s}}$	spektrální zářivost šedého povrchu	$[W \cdot m^{-3}]$
I	elektrický proud	[A]
J0, J1	besselova funkce prvního řádu 0. a 1. derivace	[-]
MTI	měřicí transformátor proudu	
Q	teplo	[J]
Q_u	užitečné teplo	[J]
Q_z	ztrátové teplo	[J]
R, R ₀	odpor	[Ω]
S	plocha, povrch	$[m^2]$
U	napětí	[V]
W	spotřeba	$[W \cdot h]$
W_m	měrná spotřeba	$[W \cdot h/kg]$
a_e	ekvivalentní hloubka vniku elektromagnetické vlny	[m]
c	měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
f	kmitočet	[Hz]
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	jednotkový vektor ve směru souřadných os x, y, z	
m	hmotnost	[kg]
\vec{n}	normálový vektor k izotermě	[V]
P	činný výkon	[W]
r	poloměr	[m]
t	čas	[s]
x, y, z	souřadnice bodů	
Θ	teplota	[K]
α	teplotní součinitel	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
ε	emisivita	[-]
ϑ	teplota	[°C]
λ	vlnová délka	[m]
ρ	rezistivita	[Ω]
ω	úhlový kmitočet	$[rad \cdot s^{-1}]$

Obsah

1	Úvod	1
2	Základní pojmy	2
2.1	Definice teploty	2
2.2	Definice tepla	2
2.3	Šíření tepla	2
2.3.1	Šíření tepla vedením	4
2.3.2	Šíření tepla prouděním	5
2.3.3	Šíření tepla zářením	6
3	Elektrický odporový ohřev	11
3.1	Přímý odporový ohřev	12
3.1.1	Metody výpočtu přímého odporového ohřevu	16
3.1.2	Možnosti řešení výpočtovými programy	18
4	Měření teploty	19
4.1	Senzory pro měření teploty	21
4.2	Měřicí soustava pro měření teploty	25
5	Laboratorní model	26
5.1	Popis laboratorního modelu	27
6	Experimentální měření	34
6.1	Volba parametru optimalizace	34
6.2	Volba parametru vsázky a izolace	34
6.3	Popis měření	36
6.4	Měření na ocelových tyčích	36
6.5	Měření na mosazných tyčích	41
6.6	Měření na měděných tyčích	42
7	Optimalizace přímého odporového ohřevu	44
7.1	Ocelové tyče	44
7.1.1	Vliv velikosti napájecího proudu s regulací a bez regulace na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	45
7.1.2	Vliv průměru tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	46

7.1.3	Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	47
7.2	Mosazné tyče	47
7.2.1	Vliv velikosti napájecího proudu bez regulace na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	48
7.2.2	Vliv průměru tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	49
7.2.3	Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	49
7.3	Měděné tyče	50
7.3.1	Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu	50
7.4	Zhodnocení dosažených výsledků	50
8	Závěr	52
	Literatura	53
	Seznam příloh	54

Kapitola 1

Úvod

Elektrická energie se v současné společnosti využívá úplně všude. Jednou z možností použití el. energie je elektrický ohřev. Ten může být použit v mnoha aplikacích. Využívá se k tavení kovů, ale i pro vytápění domů. Díky velkému skoku ve vývoji polovodičových technologií se účinnost elektrického ohřevu výrazně zvýšila.

Elektrický ohřev může využívat mnoho principů. Jedním z nich je elektrický obloukový ohřev, který pracuje na principu přenosu energie oblouku do vsázky a to přímo nebo nepřímo. Dalším je elektrický indukční ohřev využívající elektromagnetického pole k přenosu energie do vsázky. Na nejjednodušším principu pracuje elektrický odporový ohřev.

Ten využívá vodivého média, kterým prochází elektrický proud k přeměně elektrické energie na tepelnou. Tato přeměna se řídí určitými principy a zákony. Pokud je vsázka ohřívána pouze zářením a prouděním, mluvíme o takzvaném nepřímém odporovém ohřevu. Pokud teplo vzniká přímo ve vsázce jedná se o přímý odporový ohřev. Tento ohřev je jedním z neúčinnějších způsobů ohřevů. Pro jeho provozování nejsou vysoké nároky na řízení. Zařízení pro přímý odporový ohřev mají jednoduchou obsluhu, malou poruchovost a snadnou údržbu.

Úkolem této diplomové práce je provést rozbor a optimalizaci přímého odporového ohřevu. Práce se skládá ze dvou částí: teoretické, kapitola dva až čtyři a praktické, kapitola pět až sedm. V teoretické části jsou rozebrány základní principy šíření tepla, princip funkce a měření přímého odporového ohřevu. V praktické části je provedeno laboratorní měření na experimentálním modelu. Výsledky tohoto měření jsem využil k rozboru vlivů, které na přímý odporový ohřev působí. V závěrečné části této práce jsou zhodnoceny dosažené výsledky a obecně popsány zákonitosti, kterými se přímý odporový ohřev řídí.

Kapitola 2

Základní pojmy

2.1 Definice teploty

Teplota je jedna z důležitých termodynamických vlastností určujících stav hmoty. Používá se v mnoha fyzikálních zákonech. Na teplotě je závislých mnoho vlastností látek. Dá se ve své podstatě označit jako míra kinetické energie pohybu atomů a molekul. Při svém pohybu na sebe tyto částice vzájemně narážejí a rychlost jejich pohybu se v čase neustále mění. V kapalinách (kapalném skupenství) je pohyb částic neuspořádaný v celém objemu, kdežto v pevných látkách (pevné skupenství) částice neuspořádaně kmitají kolem rovnovážných pozic. V případě, že na hmotu nepůsobí okolní prostředí je rychlost pohybu částic konstantní. Tato rychlost je závislá na teplotě a termodynamické teplotě zkoumaného tělesa. Je tedy závislá na kinetické energii částic, neboli jejich rychlosti pohybu a hmotnosti. Veškerý pohyb ustává při takzvané absolutní teplotní nule, neboli 0 K (nula termodynamické stupnice). Tato teplota se pokládá za nejnižší. Pro zjištění teploty se využívá závislostí jiných fyzikálních veličin. Nejvhodnější jsou takové, u kterých závislost můžeme vyjádřit matematicky teplotní stupnicí. [4]

2.2 Definice tepla

Teplu je míra změny vnitřní energie systému při styku s jiným systémem, aniž by při tom docházelo ke konání práce. Teplu tedy popisuje změnu stavu tělesa, kdežto teplota popisuje stav tělesa.

2.3 Šíření tepla

Teplu se přenáší z tělesa s vyšší teplotou na těleso s nižší teplotou třemi způsoby:

- Vedením (kondukcí) - většinou u těles v pevném skupenství
- Prouděním (konvekcí) - v prostředích plynných a kapalných
- Sáláním popřípadě zářením (radiací)

V reálných případech šíření tepla dochází jen velmi málo k výskytu jednoho způsobu přenosu tepla. Ve většině případů se jedná o kombinaci dvou nebo všech tří typů přenosů najednou. Pro řešení takových případů provedeme rozbor jednotlivých případů přenosů odděleně. Celkovou přenesenou energii získáme součtem energie přenesených v jednotlivých případech.

Šíření tepla - pojmy

1. Isothermy - křivky spojující body se stejnou teplotou. Znázornění na obrázku 2.1.
2. Isothermické plochy - jsou to plochy, které zahrnují body se stejnou teplotou.
3. Teplotní spád - označovaný také jako $\text{grad}\vartheta$ (gradient) je limitní hodnota poměru $\Delta\vartheta$ k Δn . Označení \vec{n}_0 je jednotkový vektor ve směru normály \vec{n} .

$$\text{grad}\vartheta = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta\vartheta}{\Delta n} \vec{n}_0 = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \vec{n}_0 \quad (2.1)$$

Vektor ve směru \vec{n} , tedy ve směru normály k isothermě, můžeme rozložit na složky ve směru souřadných os. Potom jednotkové vektory budou označeny \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} , ve směru souřadných os x , y , z . Výsledná rovnice potom bude vypadat takto:

$$\text{grad}\vartheta = \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\vartheta}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \vec{k} \quad (2.2)$$

Pokud roste od nižší teploty k vyšší označuje se vektor kladně. Pokud klesá (od vyšší k nižší) značí se záporně. Vektorové pole je tvořeno množinou teplotních gradientů. Toto vektorové pole existuje jedině když dochází ve zkoumaném objemu k šíření tepla. Pokud rozdíl teplot neexistuje, to znamená, že celý objem má stejnou teplotu. Platí $\vartheta = \text{konst.}$ Potom:

$$\text{grad}\vartheta = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \vec{n}_0 = 0 \quad (2.3)$$

4. Fourierův zákon - udává jaký je vztah mezi tepelným tokem a teplotním spádem.

$$d\vec{Q} = -\lambda \frac{\partial\vartheta}{\partial n} dS dt \quad (2.4)$$

$d\vec{Q}$ - je množství tepla, které projde kolmo elementární ploškou S isothermické plochy za čas dt . Velikost tohoto toku je závislá na fyzikálních vlastnostech prostředí a na teplotním spádu ϑ . Vlastnosti prostředí jsou vyjádřeny součinitelem λ .

λ - je měrná tepelná vodivost

5. Hustota tepelného toku (tepelný příkon) - tepelný tok procházející danou plochou za jednotku času. Značí se \vec{q} .

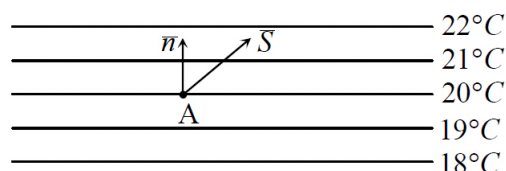
$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \vec{n}_0 \quad (2.5)$$

Stejně jako teplotní gradient můžeme i tepelný tok rozdělit na tři složky, které budou ve směru os x , y a z . Výsledná rovnice potom bude vypadat takto:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \vec{i} - \lambda \frac{\partial\vartheta}{\partial y} \vec{j} - \lambda \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \vec{k} \quad (2.6)$$

tedy

$$\vec{q} = \vec{q}_x + \vec{q}_y + \vec{q}_z \quad (2.7)$$



Obrázek 2.1: Isothermy

2.3.1 Šíření tepla vedením

Šíření tepla vedením je velmi složitý proces. Řešení tohoto přenosu tepla nelze v obecném případě matematicky zvládnout. Proto se zkoumají při výpočtech elektrických pecí jen jednodušší případy za použití zjednodušujících předpokladů. Jedním takovýmto předpokladem bude šíření tepla pouze ve stejnorodém prostředí. Za stejnorodé (isotropní) označujeme jen takové prostředí u kterého jsou fyzikální vlastnosti ve všech směrech stejné.

Teplotní pole určuje tepelný stav daného prostředí. Je to množina okamžitých teplot všech bodů ve zvolené části prostoru. U teplotního pole mají dva nekonečně blízké body nekonečně malý teplotní rozdíl. Takovému poli říkáme, že je spojitě. Nejobecnějším případem je trojrozměrné neustálené teplotní pole, u kterého musíme brát v potaz souřadnice bodu x , y , z a také časovou souřadnici t . Tento případ je potom dán výrazem:

$$\vartheta = f(x; y; z; t) \quad (2.8)$$

Jako zvláštní případ takového obecného pole je takzvané ustálené pole, kde je teplota bodů v čase konstantní. Z toho vyplývá:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

Proto je takový případ popsán výrazem:

$$\vartheta = f(x; y; z) \quad (2.10)$$

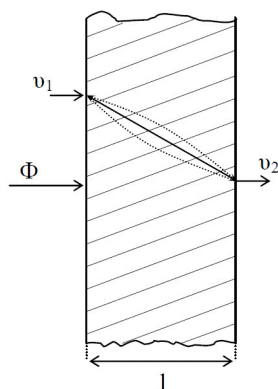
Jako další zvláštní případ můžeme uvést šíření tepla rovnou stěnou (obrázek 2.2) za předpokladů nekonečných rozměrů. Taková stěna odděluje dvě prostředí o různých teplotách (ϑ_1, ϑ_2), tepelný tok v takovém prostředí postupuje pouze jedním směrem a to kolmo k rozhraní. Zde z výrazu můžeme vypustit souřadnice y a z . Potom bude mít tvar pro neustálený stav:

$$\vartheta = f(x; t) \quad (2.11)$$

a pro ustálený stav:

$$\vartheta = f(x) \quad (2.12)$$

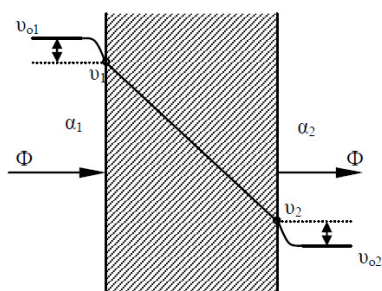
Šíření tepla vedením vzniká v pevných látkách, kapalinách i plynech a to v případě, že není ve všech místech zkoumaného prostoru stejná teplota. Množství tepla, které je v takovém prostředí přeneseno závisí na struktuře látky. Mezi částicemi uvnitř hmoty dochází k přenosu energie. Při řešení šíření tepla vedením se využívá takzvaného Fourierova zákona.



Obrázek 2.2: Šíření tepla rovinnou stěnou [2]

2.3.2 Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním se u elektrických pecí bere v potaz hlavně při nižších teplotách, jelikož dochází k ochlazování povrchem a tím k ztrátám u odporových, obloukových popřípadě i indukčních pecí. Při vyšších teplotách se začínají více uplatňovat ztráty sáláním. Na obrázku 2.3 je zobrazeno šíření tepla prouděním okolo kolmé stěny:



Obrázek 2.3: Šíření tepla prouděním v okolí kolmé stěny [2]

Na obrázku je zobrazena svislá stěna. Na jedné straně stěny je teplota ϑ_{o1} na druhé straně je teplota ϑ_{o2} , která je nižší než ϑ_{o1} . (Teploty ϑ_{o1} a ϑ_{o2} jsou v okolí stěny, ne na jejím povrchu). Uvažujeme-li s ustáleným tepelným stavem, bude procházet stěnou stálý tepelný tok směrem k vnějšímu povrchu. Na povrchu takové stěny vznikne teplota $\vartheta_1 < \vartheta_{o1}$. Oproti tomu na druhé straně stěny bude teplota $\vartheta_2 > \vartheta_{o2}$. Prostředí (plynné nebo kapalné) v okolí stěny se začne zahřívat, protože teplejší částice prostředí stoupají směrem nahoru (jsou lehčí než studené) a studené částice je nahrazují. Na rozhraní stěna - prostředí dojde k takzvanému přirozenému proudění.

Mezi stěnou a prostředím vždy zůstává malá vrstva plynu, která se prouděním nezúčastní. Díky této vrstvě plynu je i v ustáleném stavu mezi povrchem stěny a okolním prostředím určitý rozdíl

teplot. Jelikož touto tenkou vrstvou prochází tepelný tok pouze vedením a tepelná vodivost plynu je malá, dochází v tomto místě k tepelnému skoku.

Pro zvýšení účinnosti ochlazování můžeme použít například ventilátor. V tomto případě dochází k umělé cirkulaci plynného prostředí a tím k zeslabení vrstvy ulpívající na povrchu. Při výpočtu šíření tepla prouděním používáme Newtonův vztah:

$$\Phi = \alpha_1(\vartheta_{o1} - \vartheta_1)S \quad (2.13)$$

$$\Phi = \alpha_2(\vartheta_2 - \vartheta_{o2})S \quad (2.14)$$

α - je součinitel přestupu tepla. Jeho velikost je závislá na velkém množství činitelů (rozměry, tvar, plocha, hladkost povrchu, viskozita prostředí, rychlost proudění a dalších). Pokud je pro ochlazování použito umělé cirkulace je součinitel přestupu tepla větší než při použití cirkulace přirozené.

Φ - tepelná tok [$J \cdot s^{-1}$]

2.3.3 Šíření tepla zářením

Pokud je teplota tělesa větší než absolutní nula vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Tepelná energie je vyzařována ve formě elektromagnetického vlnění. Takto vyzařovaná energie se šíří v průzračném prostředí všemi směry. Všechna tělesa, která se nacházejí v takovémto prostředí, vyzařují svým povrchem energii do okolí a současně přijímají energii vyzařenou jinými tělesy. Ve chvíli kdy dopadne zářivá energie na neprůzračné těleso dojde k jejímu pohlcení a přeměně na tepelnou energii.

Když těleso přijímá více energie než vyzařuje dochází k jeho zahřívání. Pokud je tomu naopak dochází k ochlazování tělesa. Každé prostředí částečně pohlcuje záření které jím prochází. Výjimkou je takzvaný absolutně prázdný prostor, který je absolutně průzračný pro procházející záření.

Při dopadu záření na povrch jakéhokoli tělesa se záření (tok energie) rozdělí na tři části:

1. část odražená - odrazí se od tělesa do prostoru
2. část procházející - projde tělesem
3. část pohlcená - přemění se na teplo

Rozlišujeme dva extrémní případy povrchů:

1. Absolutně černé těleso - pohlcuje všechnu dopadající energii
2. Absolutně bílé těleso - odráží všechnu dopadající energii

Takovéto případy ve skutečnosti ale neexistují (žádné těleso není absolutně bílé ani černé). Reálná tělesa mají z fyzikálního hlediska povrchy "šedé".

Kirchhoffův zákon nám říká, že absolutně černé těleso je schopno všechny dopadající paprsky pohltit a dokáže i maximálně energii vyzařit. Absolutně černé těleso proto slouží jako srovnávací prvek (etalon) ke srovnání schopnosti vyzařovat energii pro jiná tělesa. Z toho důvodu jsou základní zákony pro záření odvozeny právě pro absolutně černé těleso. Jak už bylo výše uve-

deno dopadající záření se rozdělí na tři části:

$$\begin{aligned} A - \text{záření pohlcené} &\Rightarrow A - \text{poměrná pohltivost} \\ B - \text{záření odražené} &\Rightarrow B - \text{poměrná odrazivost} \\ C - \text{záření pohlčené} &\Rightarrow C - \text{poměrná propustnost} \end{aligned}$$

Víme, že dopadající záření je rovno 1 potom platí:

$$1 = A + B + C \quad (2.15)$$

Existují povrchy, které neobsahují všechny složky. Jako příklad můžeme uvést povrch absolutně černý kde $A = 1$. Můžeme napsat:

$$1 = 1 + B + C \quad (2.16)$$

z toho vyplývá

$$B = 0$$

$$C = 0$$

Pro absolutně bílý povrch, platí $B = 1$

$$1 = A + 1 + C \quad (2.17)$$

$$A = 0$$

$$C = 0$$

U těles neprůsvitných je $C = 0$

$$1 = A + B \quad (2.18)$$

Protože jednotlivé složky (A , B , C) vycházejí pro různé vlnové délky různě, musíme uvažovat spektrální hodnoty těchto složek pro danou vlnovou délku λ .

A_λ - poměrná pohltivost

B_λ - poměrná odrazivost

C_λ - poměrná propustnost

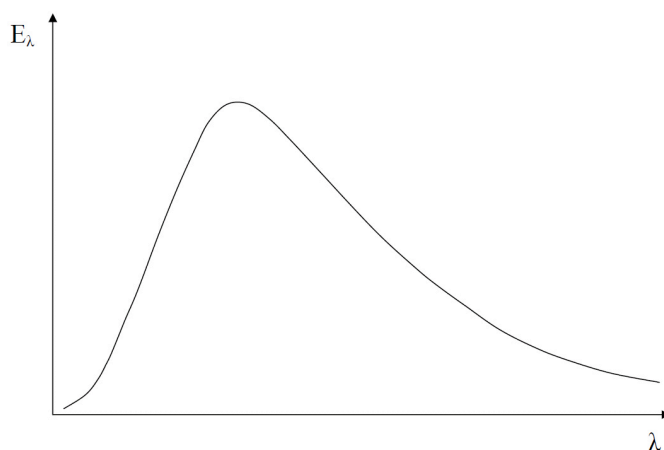
Pro takto definované složky platí vztah:

$$1 = A_\lambda + B_\lambda + C_\lambda \quad (2.19)$$

Zákony záření pro povrch absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso, jehož povrch je zahřátý, vyzařuje souvislé spektrum záření. Na obrázku 2.4 je zobrazena závislost spektrální zářivosti E_λ na vlnové délce λ . Úhrnná zářivost, neboli emise E , je úhrnná energie vyzářená jednotkou povrchu zahřátého tělesa. Pro úhrnnou zářivost platí vztah 2.20.

$$E = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_\lambda d\lambda \quad (2.20)$$



Obrázek 2.4: Průběh spektrální zářivosti v závislosti na vlnové délce

- Kirchhoffův zákon pro záření - Definice: Poměr úhrnné zářivosti $E_{\tilde{s}}$ (šedého povrchu) s relativní pohltivostí $A_{\tilde{s}}$ závisí pouze na teplotě tělesa Θ , ne však na barvě jeho povrchu. Pro těleso s absolutně černým povrchem je poměr pohltivosti $A_{\tilde{c}} = 1$. To znamená, že absolutně černý povrch pohlcuje všechno dopadající záření. Můžeme tedy napsat rovnici 2.21.

$$\frac{E_{\tilde{s}}}{A_{\tilde{s}}} = f(\Theta) = \frac{E_{\tilde{c}}}{A_{\tilde{c}}} = E_{\tilde{c}} \quad (2.21)$$

Na základě těchto poznatků můžeme říci, že nejsilněji vyzařují černé povrchy. Úpravou rovnice 2.21 získáme rovnici 2.22, která nám vyjadřuje úhrnnou zářivost povrchu šedého tělesa.

$$E_{\tilde{s}} = A_{\tilde{s}} E_{\tilde{c}} \quad (2.22)$$

Kde poměrná pohltivost šedého povrchu $A_{\tilde{s}}$ je vždy menší než 1.

Kirchhoffův zákon pro záření platí i pro spektrální zářivost E_{λ} a spektrální pohltivost A_{λ} . Tyto veličiny jsou také dány pouze velikostí absolutní teploty Θ a vlnovou délkou λ . Pro Kirchhoffův zákon potom můžeme napsat vztah 2.23.

$$\frac{E_{\lambda\tilde{s}}}{A_{\lambda\tilde{s}}} = f(\Theta; \lambda) = E_{\lambda\tilde{c}} \quad (2.23)$$

- Stefan-Boltzmanův zákon - byl odvozen na základě měření. Vyjadřuje závislost mezi absolutní teplotou Θ a úhrnnou zářivostí $E_{\tilde{c}}$ absolutně černého povrchu tělesa. Tato závislost je popsána vzorcem 2.24

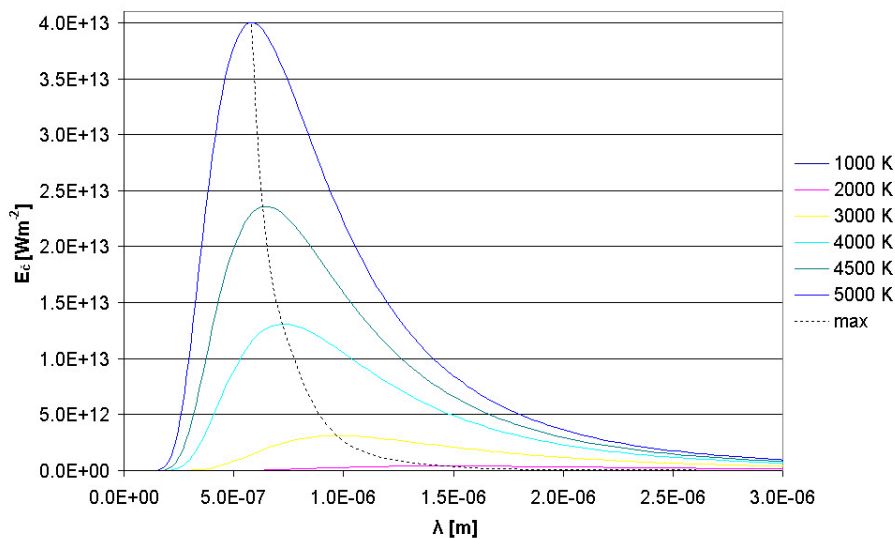
$$E_{\tilde{c}} = \sigma_{\tilde{c}} \Theta^4 \quad (2.24)$$

$\sigma_{\tilde{c}}$ - Stefan-Boltzmanova konstanta je součinitel sálání absolutně černého povrchu tělesa. Její hodnota je $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

- Wienův zákon - Popisuje závislost mezi spektrálním zářením E_{λ} a vlnovou délkou λ . Při absolutní teplotě Θ má spektrální záření E_{λ} maximum pro danou vlnovou délku λ_{max} . Hodnota λ_{max} je nepřímo úměrná absolutní teplotě Θ . Tato závislost je popsána rovnicí 2.25.

$$\lambda_{max} = \frac{2892 \cdot 10^3}{\Theta} \quad (2.25)$$

Po dosažení hodnoty absolutní teploty Θ do vzorce zjistíme velikost vlnové délky λ_{max} při které dochází k nejvyššímu vyzařování. Při vyšší absolutní teplotě Θ dochází k posunu nejvyššího vyzařování na stranu kratších vlnových délek. Tato závislost je zobrazena v grafu na obrázku 2.5 jako křivka max, také se někdy označuje za tzv. Wienův posunovací zákon.



Obrázek 2.5: Průběh spektrální zářivosti v závislosti na vlnové délce s vyznačením posunu maximálního vyzařování

- Planckův zákon - je to úplný zákon záření absolutně černého tělesa, který odvodil Planck. Předpokládal, že záření je tokem fotonů (elementární kvanta ϵ energie). Ty jsou úměrná kmitočtu f daného záření.

$$\epsilon = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.26)$$

h - Planckova konstanta = $6.545 \cdot 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{s}$

c - rychlost světla

Pro spektrální zářivost E_λ můžeme Planckův zákon vyjádřit vztahem 2.27.

$$E_{\lambda\epsilon} = f(\Theta; \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda\Theta}} - 1)} \quad (2.27)$$

- Planckovy křivky spektrální zářivosti - Stefan-Boltzmanův zákon můžeme upravit na základě znalostí Planckových křivek spektrálního záření. Po úpravě získáme vztah 2.28.

$$E_\epsilon = \sigma_\epsilon \Theta^4 = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_\lambda d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda\Theta}} - 1)} d\lambda \quad (2.28)$$

Výsledkem bude plocha omezena Planckovou křivkou pro danou teplotu a osou x grafu 2.5.

Záření a pohlcování pro povrch šedého tělesa

Jelikož absolutně černý povrch reálně neexistuje, musíme provést úpravu zákonů pro skutečné příklady, pro takzvané fyzikálně šedé povrchy. Z křivek Planckova diagramu víme, že absolutně černý povrch vyzařuje nepřerušované spektrum zářivosti (v křivce se nenacházejí nulové body). Toto platí i pro většinu fyzikálně šedých povrchů, které mají podobnou nepřerušovanou křivku. Poměr potom bude vypadat jako rovnice 2.29

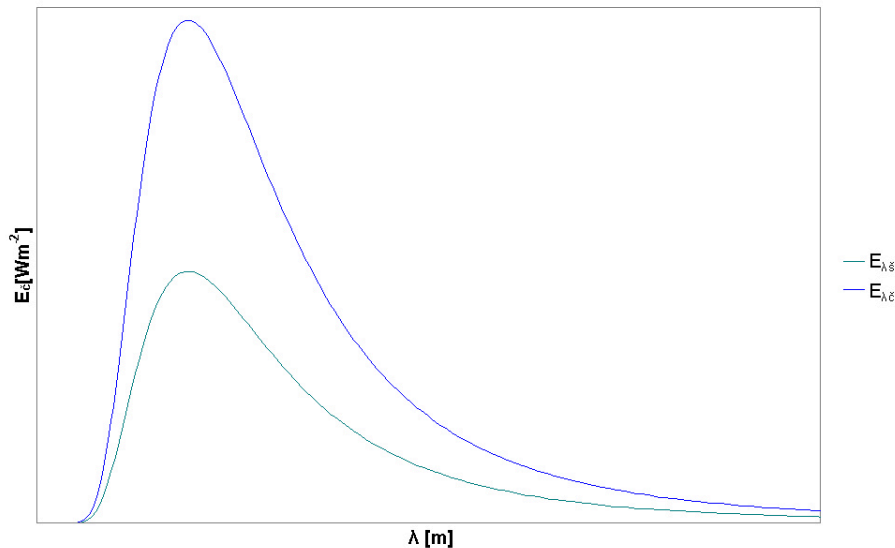
$$\frac{E_{\lambda\check{s}}}{E_{\lambda\check{c}}} = \frac{E_{\check{s}}}{E_{\check{c}}} = \varepsilon < 1 \quad (2.29)$$

kde ε je konstantní pro všechny vlnové délky a označuje se jako stupeň černosti daného povrchu nebo také emisivita.

- Stefan- Boltzmanův zákon pro fyzikálně šedé těleso

$$E_{\check{s}} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{\lambda\check{s}} d\lambda = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \varepsilon E_{\lambda\check{c}} d\lambda = \varepsilon \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{\lambda\check{c}} d\lambda = \varepsilon E_{\check{c}} = \varepsilon \sigma_{\check{c}} \Theta^4 \quad (2.30)$$

Na obrázku 2.6 vidíme průběhy spektrální zářivosti ideálního absolutně černého a reálného fyzikálně šedého povrchu tělesa při stejné absolutní teplotě. [2]



Obrázek 2.6: Průběh spektrální zářivosti v závislosti na vlnové délce porovnání absolutně černého a fyzikálně šedého povrchu tělesa

Kapitola 3

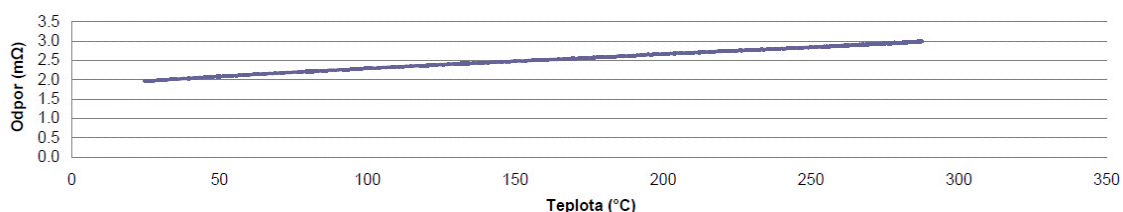
Elektrický odporový ohřev

Při průchodu elektrického proudu vodivým prostředím (vodičem) o daném elektrickém odporu dojde k ohřevu tohoto prostředí. Množství tepelné energie je přímo úměrné velikosti jeho elektrického odporu. Při ohřevu vodiče dochází k předávání části energie do okolí.

V elektrotechnice se rozlišují dva druhy částic, které přenášejí elektrický náboj. Tyto částice označujeme jako nosiče elektrického náboje. Jsou jimi elektrony a ionty. Jelikož jako elektrický proud označujeme přenos elektrických nábojů, rozlišujeme dva druhy elektrického proudu. První je elektrický proud jako přenos elektronů a druhý je elektrický proud jako přenos iontů. Materiály schopné vést elektrický proud můžeme také rozdělit. Mohou to být elektronové nebo iontové vodiče, ale toto je pouze teoretické rozdělení, protože vodiče čistě elektronové nebo čistě iontové neexistují. Ve všech vodičích se tedy nacházejí elektronové i iontové formy přenosu nábojů, přičemž většinou jedno převažuje nad druhou.

Vodiče elektronů jsou převážně kovy. Vodiče iontů jsou vodní roztoky solí nebo například tavené sklo. Hlavním rozdílem mezi těmito typy přenosu je změna velikosti elektrického odporu na teplotě. Elektrický odpor elektronového vodiče s rostoucí teplotou vzrůstá. Na obrázku 3.1 je závislost odporu měděné tyče na teplotě. Elektrický odpor iontového vodiče s rostoucí teplotou klesá. Přibližně tuto závislost můžeme vyjádřit vzorcem 3.1. [11]

$$R = R_0(1 \pm \alpha_{\Delta} \vartheta) \quad (3.1)$$



Obrázek 3.1: Průběh teplotní závislosti odporu měděné tyče

Teplotní součinitel odporu α je pro některé materiály kladný a jiné záporný. Pro materiály s převažující iontovou vodivostí (sklo, grafit a keramické materiály) je záporný a pro materiály s převažující elektronovou vodivostí (převážně kovy) kladný. Teplotní součinitel odporu materiálu je teplotně závislý, to znamená že je pro každou teplotu jinak velký.

Elektrický odporový ohřev můžeme rozdělit na dva typy:

- Přímý odporový ohřev - teplo vzniká přímo ve vsázce.
- Nepřímý odporový ohřev - teplo vzniká mimo vsázku a je do ní přenášeno zářením a prouděním.

3.1 Přímý odporový ohřev

Přímý odporový ohřev využívá Joulova zákona přímo ve vsázce, která je galvanicky připojena ke zdroji elektrické energie stejnosměrné nebo střídavé. Výsledná hodnota tepelného výkonu vzniklého při průchodu proudu vodičem je vyjádřena vztahem 3.2

$$P = RI^2 \quad (3.2)$$

Vzniklé teplo ve vodiči potom bude dáno rovnicí 3.3.

$$Q = RI^2t \quad (3.3)$$

Kde odpor vodiče lze vyjádřit vztahem 3.4.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.4)$$

Energetická bilance odporového ohřevu

Energetickou (Tepelnou) bilanci odporového ohřevu můžeme napsat:

$$Q = Q_u + Q_z \quad (3.5)$$

Q - teplo vniklé průchodem proudu ve vodiči

Q_u - užitečné teplo využité k ohřevu vsázky

Q_z - tepelné ztráty vzniklé odvodem do okolí

Po dosazení za jednotlivé veličiny získáme:

$$P_{\Delta}t = mc_{\Delta}\vartheta + \alpha_c(\vartheta_t - \vartheta_0)S_{\Delta}t \quad (3.6)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že velikost užitečného tepla závisí na hmotnosti m vsázky a její měrné tepelné kapacitě c . $\Delta\vartheta$ [°C] je změna teploty vsázky v časovém úseku Δt [s].

Tepelné ztráty závisí na celkovém koeficientu přestupu tepla α_c (proudění i sálání), rozdílu teplot okolí a vsázky $(\vartheta_t - \vartheta_0)$ a velikosti povrchu vsázky.

Praktické využití odporového ohřevu

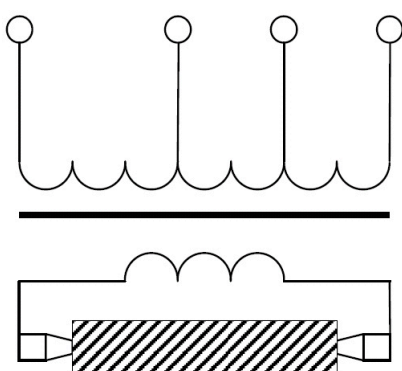
V praxi se tento způsob ohřevu využívá při:

- Ohřevu tyčového materiálu
- Ohřevu drátů
- Ohřevu plechů
- Nahřívání betonu
- Zpracování plastů
- Grafitizace uhlíku
- Tavení skla

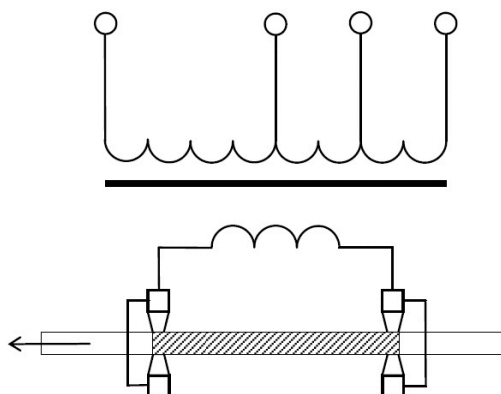
Podle způsobu ohřevu můžeme zařízení pro přímý odporový ohřev dělit na dva typy:

1. Nepohyblivé - vsázka se nepohybuje, je ohřívána po celé své délce.
2. Pohyblivé - vsázka se posouvá mezi elektrodami, část mezi elektrodami se ohřívá.

Na obrázcích 3.2 a 3.3 jsou naznačeny oba způsoby ohřevu. Vyšráfovaná část označuje místo ohřevu.



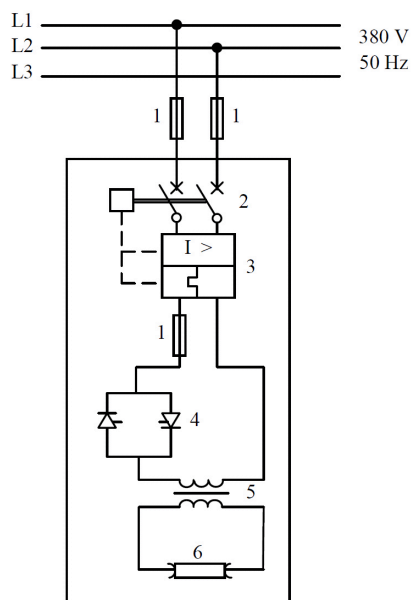
Obrázek 3.2: Nepohyblivý odporový ohřev [6]



Obrázek 3.3: Pohyblivý odporový ohřev [6]

Napájení

Pro napájení zařízení pro přímý odporový ohřev může být použit napáječ se stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pro regulaci velikosti napětí (proudu) u zařízení napájených střídavým napětím může být použito více možností, jako příklad můžeme uvést přepínání odboček transformátoru (skoková) nebo použití tyristorového regulátoru (plynulá).



Obrázek 3.4: Napájecí obvod s plynulou regulační napětí [1]: 1 - jištění, 2 - vypínač, 3 - zabezpečovací relé, 4 - tyristory, 5 - proudový transformátor, 6 - vsázka

Vliv typu napájení na rovnoměrnost rozložení měrného výkonu ve vsázce

- Stejnosměrný zdroj - za předpokladu homogenního a izotropního materiálu s vhodnou geometrií vsázky, zabezpečuje rovnoměrnou proudovou hustotu v celém průřezu ohřívaného předmětu. Při splnění těchto podmínek dochází k rovnoměrnému rozložení měrného výkonu v celém objemu vsázky, to znamená že dochází k rovnoměrnému ohřevu vsázky.
- Střídavý zdroj - v důsledku působení indukovaného pole proti poli původnímu se projeví v povrchových vrstvách ohřívané vsázky intenzivní pohlcování energie původního pole. Takovéto jevy nazýváme povrchové. [5]

Skinefekt (elektrický povrchový jev)

V obvodech napájených střídavým proudem dochází k nerovnoměrnému rozložení proudu v průřezu vodiče. Při průchodu střídavého elektrického proudu vodičem vzniká kolem tohoto vodiče magnetický indukční tok. Část tohoto magnetického indukčního toku prochází i vodičem a indukuje v něm elektrické pole, které působí proti původnímu. Působením tohoto elektrického pole dochází k zmenšení proudové hustoty uvnitř vodiče (vsázky) a jejím zvětšování směrem k povrchu.

Jelikož proudová hustota ve vodiči je v každém místě (průřezu) jiná, dochází i k nerovnoměrnému rozložení pole absorbované energie, což má za následek nerovnoměrné ohřívání materiálu v průřezu vsázky. Největší teplo při přímém odporovém ohřevu vzniká v takzvané hloubce vniku, která je závislá na fyzikálních vlastnostech materiálu a na frekvenci zdroje. Vztah 3.7 pro

ekvivalentní hloubku vniku elektromagnetické vlny do vodiče.

$$a_e = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu_0 \mu_r \omega}} \quad (3.7)$$

kde:

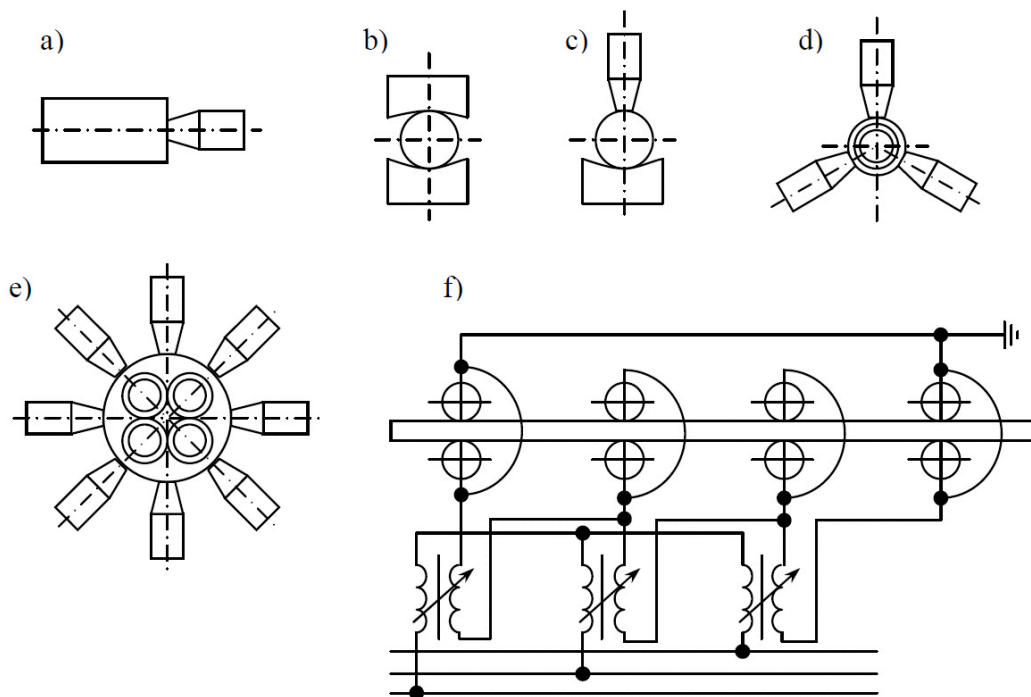
γ - konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]

ω - úhlový kmitočet [s^{-1}]

μ_0, μ_r - permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]

Elektrody

Elektrody jsou části zařízení pro přímý odporový ohřev. Slouží pro dodávání elektrické energie do vsázky. Jsou to stykové kontakty. Tvar, množství a umístění závisí na konstrukci zařízení. Pro zařízení se statickým ohřevem se používají pevné (nepohyblivé) elektrody. U zařízení s pohyblivým ohřevem se používají válečkové, kluzné nebo kapalinové elektrody. Materiál použitý na výrobu nepohyblivých, kluzných a válečkových elektrod bývá měď nebo grafit. Při velkém proudovém zatížení se používá vodní chlazení. Pro zlepšení přenosu elektrické energie do vsázky mohou být zařízení pro ohřev vybaveny přítlačným systémem, který má za úkol přitlačit elektrody ke vsázce. Příklady různých elektrod jsou na obrázku 3.5.

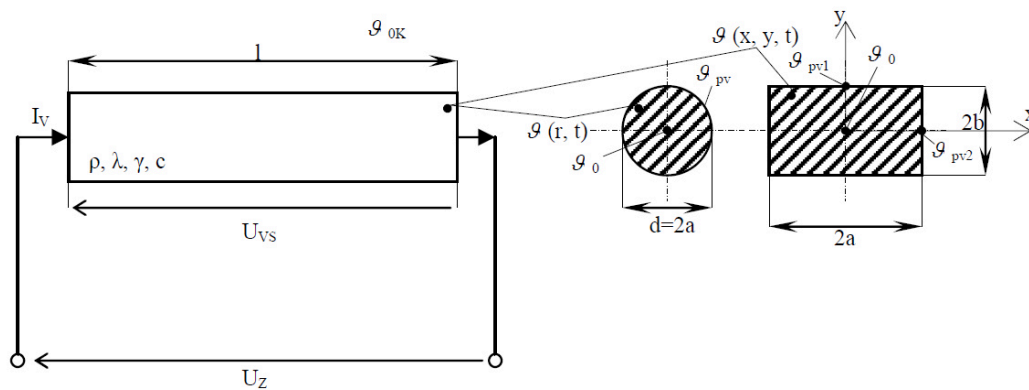


Obrázek 3.5: Stykové kontakty (elektrody) při přímém odporovém ohřevu [1]: a) - e) - stacionární elektrody (nepohyblivý ohřev), f) - válečkové elektrody (pohyblivý ohřev, trojfázové napájení)

3.1.1 Metody výpočtu přímého odporového ohřevu

Zkoumáme model přímého odporového ohřevu, jehož vsázka má různý tvar. Jako základní tvar vsázky je použit válec a hranol o určité délce l . Vsázka je připojena ke zdroji napětí s velikostí U_n a v obvodu vzniká úbytek napětí U_u . Při výpočtech využíváme některé zjednodušení a předpoklady:

- materiál ze kterého je vsázka vyrobena je homogenní, izotropní a všechny jeho parametry (ρ - rezistivita, c - měrné tepelná kapacita, γ - měrná tepelná vodivost atd.) jsou teplotně stálé.
- celý objem ohřívaného materiálu má teplotu stejnou jako je teplota okolí a to v počátku výpočtu (v čase $t=0$).
- průtok proudu objemem vsázky je rovnoměrný
- uvažují se pouze tepelné ztráty do okolí bočními stěnami povrchu vsázky. A to při konstantním součiniteli přestupu tepla α .



Obrázek 3.6: Nákres a popis vsázky kruhového a obdélníkového průřezu [3]

Ohřívání vsázky tvaru válce

V tomto případě je teplotní pole $\vartheta(r, t)$ za daných podmínek popsáno diferenciálními rovnicemi:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} - \frac{p_v}{\lambda} \quad (3.8)$$

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\gamma} \quad (3.9)$$

$$p_v = \frac{I_v^2 \rho}{\pi^2 a^4} \quad (3.10)$$

κ - součinitel teplotní vodivosti [m^2/s]

Splnění hraniční podmínky pro $t > 0$:

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=a} = -h\vartheta(a, t) \quad (3.11)$$

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 \quad (3.12)$$

$$(3.13)$$

a počáteční podmínku (pro předpoklad $\vartheta_{0k} = 0$):

$$\begin{aligned} \vartheta(r, 0) &= 0, \quad r \in \langle 0, a \rangle \\ h &= \frac{\alpha}{\lambda} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Funkce $\vartheta(r, t)$ v rozmezí $r \in \langle 0, a \rangle$ pro $t > 0$ a ϑ_{0k} vypadá takto:

$$\vartheta(r, t) = \frac{p_v}{4\lambda} \left(a^2 - r^2 + \frac{2a}{h} \right) - \frac{2p_v a^3 h}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\beta_n}{a} r\right) \exp\left(-\frac{\beta_n^2}{a^2} \kappa t\right)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + a^2 h^2) J_0(\beta_n)} + \vartheta_{0t} \quad (3.15)$$

β_n jsou prvky rovnice:

$$Bi J_0(\beta) - \beta J_1(\beta) = 0 \quad (3.16)$$

$$Bi = \frac{\alpha a}{\lambda} \quad (3.17)$$

J_0, J_1 - Besselova funkce prvního řádu nulté a první derivace

Bi - Biotovo kritérium

Ohřívání vsázky tvaru hranolu

V tomto případě je teplotní pole $\vartheta(x, y, t)$ za daných podmínek popsáno těmito diferenciálními rovnicemi:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} - \frac{p_v}{\lambda} \quad (3.18)$$

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\gamma} \quad (3.19)$$

$$p_v = \frac{I_v^2 \rho}{\pi^2 a^4} \quad (3.20)$$

Teplotní funkce $\vartheta(x, y, t)$ splňuje hraniční podmínky pro $t > 0$:

pro $y \in (-b, b)$

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=-a} - h\vartheta(-a, y, t) = \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=a} + h\vartheta(a, y, t) = 0 \quad (3.21)$$

pro $x \in (-a, a)$

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right)_{y=-b} - h\vartheta(x, -b, t) = \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right)_{y=b} + h\vartheta(x, b, t) = 0 \quad (3.22)$$

a počáteční podmínku (pro podmínku $\vartheta_{0k} = 0$):

$$\vartheta(x, y, 0) = 0, \quad x \in (-a, a), \quad y \in (-b, b)$$

$$h = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (3.23)$$

Funkce $\vartheta(x, y, t)$ s podmínkami $x \in (-a, a)$, $y \in (-b, b)$, $t > 0$ a ϑ_{0k} vypadá takto:

$$\vartheta(x, y, t) = \frac{4p_v}{\lambda} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \sin \delta_n \cdot \cos \frac{\mu_m}{a} \cdot \cos \frac{\delta_n}{b} y \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\mu_m^2}{a^2} + \frac{\delta_n^2}{b^2} \right) \kappa t \right] \right\}}{\mu_m \delta_n \left(1 + \frac{\sin 2\mu_m}{2\mu_m} \right) \left(1 + \frac{\sin 2\delta_n}{2\delta_n} \right) \left(\frac{\mu_m^2}{a^2} + \frac{\delta_n^2}{b^2} \right)} + \vartheta_{0k} \quad (3.24)$$

μ_m a δ_n jsou další prvky rovnice

$$\frac{1}{Bi_1} \mu = \cot \mu \quad (3.25)$$

$$\frac{1}{Bi_2} \delta = \cot \delta \quad (3.26)$$

pro Bi (Biotovo kritérium) platí

$$Bi_1 = \frac{ab}{\lambda} \quad (3.27)$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha a}{\lambda} \quad (3.28)$$

[3]

3.1.2 Možnosti řešení výpočtovými programy

Využití výpočetní techniky k řešení problematiky přímého odporového ohřevu má mnoho výhod ale i nevýhod. Mezi největší výhody patří rychlost řešení a velká přesnost výpočtu (v závislosti na uvažovaných zjednodušeních zavedených v programu při výpočtu). Další výhodou je, že získané výsledky mohou být automaticky zpracovány do přehledných tabulek a grafů, které si může uživatel prohlédnout popřípadě uložit pro další zpracování. Jako nevýhodu (nedostatek) tohoto způsobu řešení můžeme vidět ve zjednodušování složitých fyzikálních jevů (výsledky se většinou neshodují s reálnými naměřenými hodnotami, velikost chyb závisí na použitých zjednodušeních, které programátor ve výpočtových programech použil), které při přímém odporovém ohřevu vznikají.

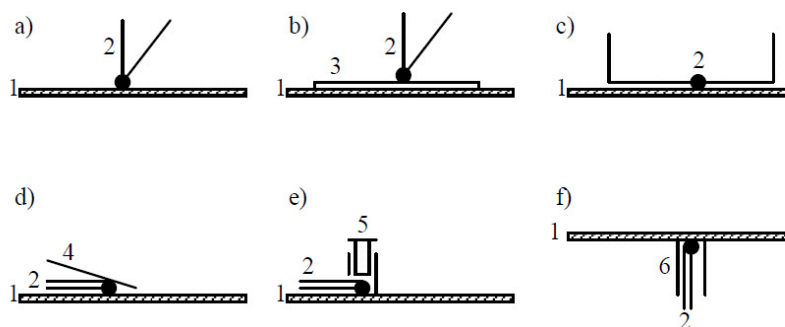
V dnešní době existuje mnoho výpočetních programů, které dokáží tuto problematiku řešit. Jako příklad můžeme uvést program NAG-REZ, simulační program PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV nebo ANSYS. Popis funkce těchto programů zde není uveden z důvodu složitosti a rozsahu, které přesahují rozsah této diplomové práce.

Kapitola 4

Měření teploty

Měření teploty slouží k zjištění tepelného stavu tělesa. Můžeme ho rozdělit na dva základní druhy:

1. Kontaktní měření teploty - při kontaktním měření teploty se teplotní čidlo (senzor), nejvíce používaný je termočlánek, přímo dotýká měřeného povrchu. Při volbě čidla a jeho upevnění k měřenému povrchu musíme brát v potaz vliv na měřený objekt. Různé způsoby upevnění jsou zobrazeny na obrázku 4.1. Na obrázcích 4.1 a), b), c) vidíme termočlánek (2), který je připájen k měřenému povrchu (1) nebo k tepelně vodivé podložce (3). Tyto způsoby lze použít jen v případě malého teplotního spádu mezi povrchem a okolím. Nejvýhodnějším z těchto způsobů je příklad 4.1 c). Zde jsou přívodní vodiče termočlánu vedeny částečně v blízkosti povrchu. Toto omezuje chybu měření odvodem tepla z termočlánu do okolí. Obrázky 4.1 d), e) zobrazují způsoby upevnění termočlánu v případě, že je nutné zesílit mechanické spojení čidla s povrchem odnímatelným spojem. V takovémto případě použijeme tenký přibodovaný plech (4) nebo navařený šroubový spoj (5). Plech se používá u laboratorního měření pro malé průměry termočlánu. Šroubový spoj se používá pro velké termočlánu. Poslední uvedený obrázek 4.1 f) ukazuje případ, kdy je termočlánek veden přímo z druhé strany měřeného objektu zvláštním otvorem (6) vytvořeným jen pro tento účel.



Obrázek 4.1: Způsoby upevnění termočlánu

2. Bezkontaktní měření teploty - je založeno na principu snímání intenzity vyzařované tepelné energie z povrchu měřeného objektu. Je to rychlý, přesný a jednoduchý způsob měření teploty povrchu. Pro přesné měření je nutno znát zásady měření a základní fyzikální zákony. Jak už bylo v předchozí kapitole (2.3.4 Šíření tepla zářením) uvedeno, každé těleso jehož teplota povrchu je větší než absolutní nula vyzařuje svým povrchem elektromagnetické záření. Velikost tohoto záření odpovídá dané teplotě (Planckův zákon vzorec 2.27 popřípadě nazorněji graf 2.5 zobrazující Planckovy křivky). Pro bezkontaktní měření teploty se využívá elektromagnetického vlnění v rozmezí délek $0,4 \mu\text{m}$ až 1 mm .
- Jako základní vztah pro bezkontaktní měření teploty se dá označit takzvaný Stefan-Boltzmanův zákon (vzorec 2.24), který nám popisuje závislost mezi absolutní teplotou a hustotou zářivého toku (úhrnné zářivosti). Energie se do prostoru nerozděluje rovnoměrně, z tohoto důvodu je třeba znát rozprostření této energie v prostoru. Zavádí se proto intenzita vyzařování I , vyjadřující část hustoty tepelného záření, která je vyzařena jednotkovým prostorovým úhlem ve směru kolmém k zářiči. Zjednodušeně se dá říct, že největší hodnota sálavého toku je ve směru normály k ploše zdroje.
- Pro vhodnou volbu bezdotykového teploměru je nutno znát i takzvaný Wienův posunovací zákon (vzorec 2.25). Ten nám říká v jaké vlnové délce se bude vyskytovat maximum hustoty zářivého toku, protože s rostoucí teplotou se maximum posouvá do kratších vlnových délek. Dalším parametrem, který je nutno znát je takzvaná emisivita ε . Je to parametr popisující kvalitu zdroje vyzařování (měřený objekt) v poměru k absolutně černému tělesu. Více v kapitole 2.3.4.

Výhodami bezdotykového měření jsou:

- Zanedbatelný vliv na měřený objekt - energie měřeného objektu není žádným způsobem odváděna měřicím přístrojem do okolí.
- Odpadá mechanické namáhání měřeného objektu - není třeba připevnit čidla na objekt
- Je možno měřit vysoké teploty
- Možnost měřit teplotu na pohybujících se objektech - příkladem může být rotující převodovka

Nevýhody bezdotykového měření:

- Nutnost znát základní zákony šíření tepla
- Chyby měření vlivem špatně zvolených parametrů - špatnou volbou emisivity nebo špatně zvoleným měřicím přístrojem pro danou vlnovou délku (teplotu), může dojít k získání nesprávných výsledků měření.
- Chyby měření špatným zaměřením objektu - ve většině případů bezdotykové měřicí přístroje snímají teplotu z kruhové plochy. Špatným zaměřením na měřený objekt může dojít k ovlivnění výsledků.

4.1 Senzory pro měření teploty

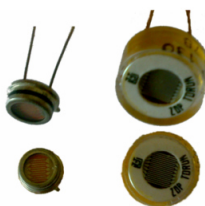
Teplotu měříme pomocí takzvaných senzorů (snímačů), které převádějí získanou tepelnou energii na jinou veličinu (napětí, proud, odpor nebo jinou veličinu). Podle fyzikálního principu, na kterém senzory pracují, je můžeme rozdělit na:

1. Polovodičové odporové - pracují na podobném principu jako kovové odporové snímače, využívají tedy teplotní závislosti odporu daného materiálu. Teplotní součinitel odporu je u polovodiče kladný zatím co u kovu (kovové odporové snímače) záporný. Polovodičový teplotně závislý odpor se nazývá termistor. Termistory můžeme rozdělit na negistory (záporný teplotní součinitel odporu) a pozistor (kladný teplotní součinitel odporu). Tyto snímače mohou mít mnoho tvarů (váleček, destička nebo kapka). Jsou výhodné pro malé rozměry a velkou tepelnou citlivost, nevýhodou je nelineární charakteristika.



Obrázek 4.2: TNC termistor TTC 104

2. Optické (detektory tepelného záření) - dají se rozdělit do dvou základních skupin:
 - (a) Tepelné (infračerveného záření) - v teplocitlivé části detektoru dochází k oteplení vlivem absorpce fotonů. Takto získaná energie se nepřímo vyhodnocuje za pomoci snímačů teploty. Tyto detektory se dají dále rozdělit na:
 - Termoelektrické snímače - jsou to seriově řazené termoelektrické články. Jsou tvořeny tenkými kovovými pásky ve stejné kombinaci (typy) jako jsou normované termoelektrické články. Počet termoelektrických spojů překračuje stovku.
 - Bolometrické snímače - jsou tvořeny teplotně závislým odporovým materiálem. Při pohlcování záření dojde k ohřevu tohoto materiálu, což způsobí změnu jeho odporu. Tyto senzory mohou být uspořádány do matic. Používají se v termovizních kamerách.



Obrázek 4.3: Fotorezistory

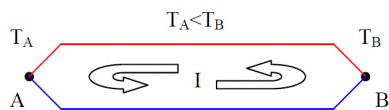
- Pyroelektrické snímače - pracují na pyroelektrickém jevu. Což je jev při kterém působením tepla dochází k nabíjení povrchu tělesa spontánní polarizací. Tento jev se vyskytuje u pyroelektrických materiálů a u některých feroelektrických materiálů.
- (b) Kvantové - detektory absorbují záření v interakci s elektrony vázaných v atomech mřížky nebo v atomech příměsí nebo s volnými elektrony. Absorbce záření (fotonů) je spojena s jevem, jako příklad můžeme uvést přechod elektronů mezi kvantovými stavy v polovodičích. Získaný výstupní průběh detektoru nezávisí přímo na energii absorbovaných fotonů, závisí na jejich počtu. Kvantové snímače jsou snímače polovodičové. Dle typu použitého polovodiče je můžeme rozdělit na:
- Vlastní (intrinsické) kvantové snímače - jsou vyrobeny z čistého polovodiče. Pracují na principu fotokonduktce, generují nosiče elektrického náboje. Což znamená, že mění svou vodivost. Pro svou funkci potřebují vnější zdroj napětí.
 - Nevlastní (extrinsické) kvantové snímače - jsou tvořeny PN přechodem nevlastních polovodičů. Existují ve dvou režimech:
 - Fotokonduktivní - pracují na stejném principu jako vlastní kvantové snímače. To znamená, že při ozáření kvantového snímače dochází k poklesu odporu. Tyto snímače potřebují externí zdroj napětí.
 - Fotovoltaický - při ozáření (IR zářením) PN přechodu polovodiče dochází k vzniku elektrického napětí, jehož velikost je závislá na počtu absorbovaných fotonů.
3. Odporové - pracují na principu změny rezistivity čidla v závislosti na jeho teplotě. Jako příklad odporových snímačů teploty můžeme uvést snímače platinové, niklové, měděné. U odporových snímačů teploty rozeznáváme dvě základní provedení. Snímač ve vinutém provedení, kdy odporové vinutí je uloženo uvnitř nebo vně keramického tělíska, kde je určitým způsobem zajištěno. Můžeme se také setkat s takzvaným skleněným odporem, který se skládá z trnu tvrdého skla na kterém je navinut odporový materiál zajištěný vrstvou z měkčího skla. Druhé provedení se nazývá vrstevové u kterých je vinutí nahrazeno tenkou odporovou vrstvou nanesenou na nosnou destičku (většinou keramickou).



Obrázek 4.4: Platinový odporový senzor v keramickém pouzdru

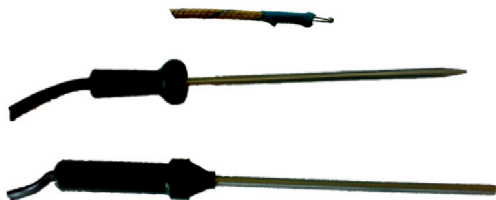
4. Akustické - pracují na principu teplotní závislosti šíření zvuku v různých prostředích. Pomocí generátoru pulzu (ultrazvukového) je do prostředí vyslán impuls a vyhodnocuje se za jak dlouho je zaznamenán snímačem.
5. Termoelektrické články - jsou založeny na Seebeckově jevu (převod tepelné energie na elektrickou). Termoelektrické články jsou vždy složeny ze dvou vodičů. V uzavřeném obvodu, který se skládá ze dvou vodičů různého materiálu (vodiče nebo polovodiče), při různé teplotě spojů A a B protéká proud I (obrázek 4.5). V případě rozpojení obvodu v jakémkoliv

místě, bude na vzniklých koncích elektrické napětí dané Seebeckovým vztahem.



Obrázek 4.5: Seebeckův jev u termoelektrických článků

Termoelektrických článků existuje mnoho typů. Pro výrobu termoelektrických článků byly normalizovány jednotlivé páry termoelektrických materiálů. Tyto páry byly vybrány tak, aby zajistily minimální nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro zvolený rozsah. Dále byly brány v potaz korozní a chemické vlivy. Výsledné termoelektrické články jsou označovány velkými písmeny podle normy. Jako příklad můžeme uvést termočlánek TYP J: Fe-CuNi, +20 až +700 °C dlouhodobě, -180 až 750 °C krátkodobě.

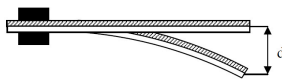


Obrázek 4.6: Provedení termoelektrických článků

6. Dilatační - fungují na principu teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů. Podle konstrukčního uspořádání dělíme dilatační teploměry na:

- Tyčové - čidlo tyčového teploměru je sestaveno ze dvou částí. Z trubice s velkým teplotním součinitelem délkové roztažnosti ve které je umístěna tyč s malým teplotním součinitelem délkové roztažnosti. Tyto dva díly jsou spojeny v jednom místě.
- Bimetalické - jejich princip působení je založen na rozdílné teplotní roztažnosti dvou kovových pásků. Tyto dva pásy jsou podélně svařeny k sobě. Při působení teploty dojde k prodloužení obou materiálů. Každý materiál se ale roztáhne jinak. Protože jsou materiály pevně spojeny dojde k prohnutí bimetalového pásku, velikost tohoto prohnutí závisí na rozdílu teplotních součinitelů roztažnosti a délce pásků. Používají se hlavně jako akční členy pro dvoupolohové nebo lineární snímání (dvoupolohové - zapnuto x vypnuto). Na obrázku 4.7 vidíme bimetalový pásek při dvou různých teplotách, d značí velikost výchylky při zvýšení teploty. Některé bimetalové snímače jsou tvořeny bimetalovým páskem stočeným do spirály, tento pásek je na vnějším konci

pevně spojen s krytem a na konci uprostřed spirály je pevně spojen s volně se otáčející osou. Při změně teplot mění spirála své parametry čímž natáčí středovou osičku na které je připevněn ukazatel teploty.

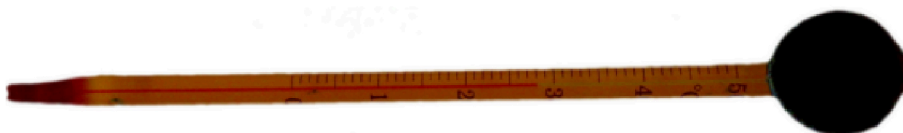


Obrázek 4.7: Bimetalový pásek



Obrázek 4.8: Bimetalové teploměry a spínač

- Bimateriálové - pracují na stejném principu jako bimetalové snímače. Jediným rozdílem jsou používané materiály, kombinace kov - nekov (polovodič).
- Skleněné - jsou to skleněné trubičky naplněné kapalinou. Používají se kapaliny s vysokou teplotní objemovou roztažností, které mají charakteristiky roztažnosti s téměř lineárním průběhem. Nejpoužívanější je rtuť nebo líh. Lineární provedení se skládá ze skleněné trubičky ve které je kapalina, tato trubička je umístěna na destičce se stupnicí. Dvoupolohové provedení je také skleněná trubička naplněná rtutí. Tato trubička je opatřena kontakty, kdy jeden je stále ponořený ve rtuti a druhý je umístěn v klidové poloze nad rtutí. Při vzrůstu teploty na určitou hodnotu dojde k ponoření druhého kontaktu do rtuti (rtuť nabývá na objemu), to spojí elektrický obvod.



Obrázek 4.9: Skleněný teploměr

Toto jsou jenom vybrané typy, existují i další.

Senzory můžeme také rozdělit podle toho jestli jsou v kontaktu s měřeným prostředím na:

1. Kontaktní senzory teploty

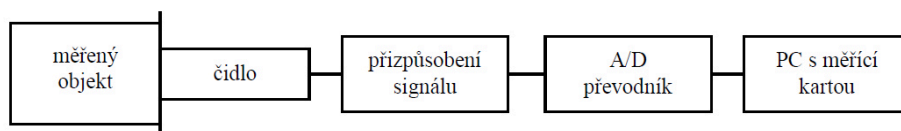
2. Bezkontaktní senzory teploty

Nebo podle způsobu transformace signálu na:

1. Aktivní senzory teploty - působením teploty se chovají jako zdroj (termoelektrický článek).
2. Pasivní senzory teploty - u těchto senzorů je nutno připojit externí elektrické napájení, měření je prováděno takzvaným nepřímým způsobem. [4]

4.2 Měřicí soustava pro měření teploty

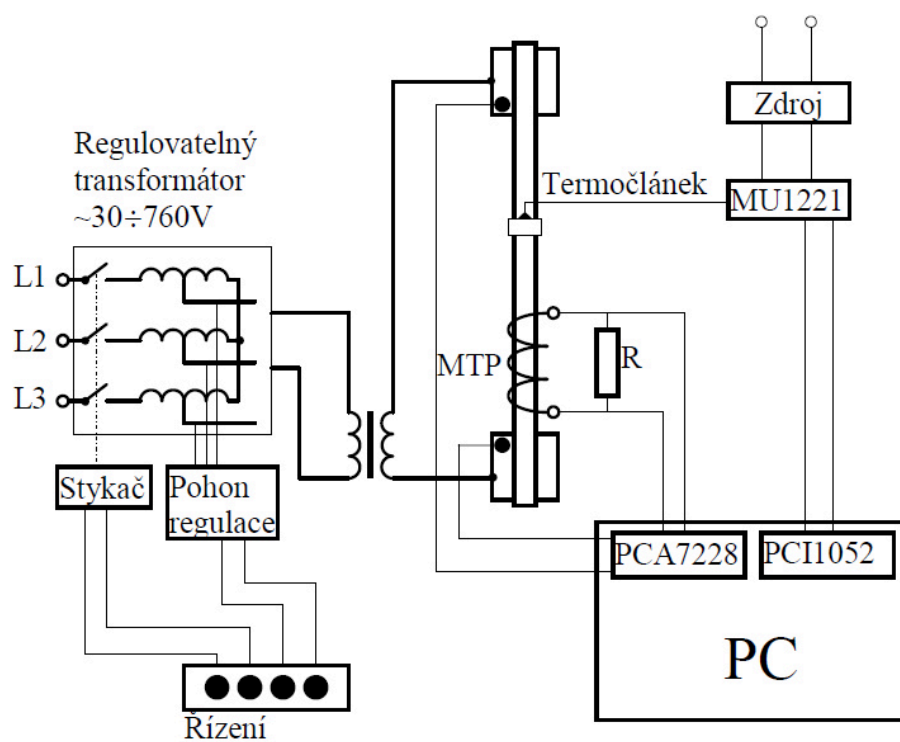
Při měření teploty získáváme jako výstupní hodnotu čidla analogový signál. Tento signál musí být upraven (přizpůsoben) na vhodný tvar pro další zpracování. Jako úprava se v tomto případě myslí zesílení, filtrace nebo převedení veličiny získanou (řada čidel má proudový výstup) na výstupu čidla na formu ve které může být dále zpracován (většinou napěťový signál). Po upravě analogového signálu musí být signál digitalizován. Toto se provádí v takzvaných A/D převodnících. Po převedení do digitální podoby může být signál dále zpracováván pomocí mikrokontroleru, počítače, programovatelné logické jednotky a dalších systémů.



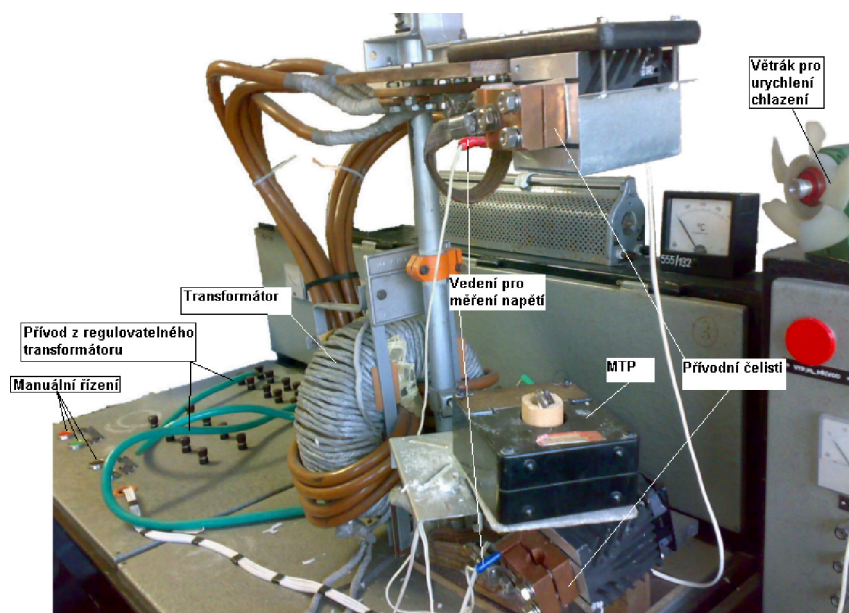
Obrázek 4.10: Příklad měřicí soustavy

Kapitola 5

Laboratorní model



Obrázek 5.1: Principiální schéma laboratorního modelu



Obrázek 5.2: Laboratorní model

5.1 Popis laboratorního modelu

Laboratorní model se skládá ze tří hlavních částí:

1. Napájecí - je tvořena regulovatelným transformátorem, transformátorem s pevným převodem, přívodním vedením a čelistmi. Tyto čelisti jsou tvořeny dvěma masivními kovovými díly ve kterých jsou vyfrézovány díry pro tyč a měřicí vedení (měření napětí). K sobě jsou tyto díly upevněny šrouby. Přívod regulovatelného transformátoru je opatřen stykačem, který slouží k připojení nebo odpojení napájecího napětí.
2. Regulační - slouží k změně velikosti napětí na sekundární straně regulovatelného transformátoru. Regulace je prováděna pomocí servopohonu. Může být řízena dvěma způsoby:
 - Manuální - řízení je prováděno uživatelem za pomoci tlačítek na měřicím pultu. Tlačítka jsou čtyři: zvýšení a snížení napětí, vypnout nebo zapnout napájení (stykač). Při stlačení tlačítka (s požadovanou funkcí) dojde k sepnutí pohonu, který reguluje napětí. Velikost zvýšení nebo snížení napětí závisí pouze na délce sepnutí příslušného tlačítka, což způsobuje problémy při přesném nastavení zvolené hodnoty proudu.
 - Automatická - princip fungování je téměř stejný jako manuální. Jediným rozdílem je, že ovládání manuální je přemostěno pomocí čtyř výkonových relé, které přebírají funkci manuálních tlačítek a jsou řízena za pomoci osobního počítače. Konstrukce automatického řízení je tvořena výkonovým spínacím polem (pět relé) řízeným za pomoci integrovaného obvodu ULN2003A (tranzistorové pole v darlingtonově zapojení s výstupními parametry: maximální proud 500 mA, maximální napětí 50 V) a 12bitovou ADC kartou PCA-7228AS, která vysílá řídicí impulzy dané řídicím programem.

3. Měřicí - slouží k získávání hodnot požadovaných veličin. Měřenými veličinami jsou: úbytek napětí na tyči, proud tekoucí obvodem a teplota tyče. Skládá se z několika částí:

- Termočlánek - slouží jako čidlo pro měření teploty. Pro toto měření je použit termočlánek TYP K. Jeho parametry jsou: složení NiCr-NiAl, měřicí rozsah 0 až +1100 °C dlouhodobě, -180 °C až +1350 °C krátkodobě a měrná tepelná závislost je v rozsahu teplot 100 °C až 1000 °C v rozmezí 43 až 39 μ V/°C. Tento termočlánek je připojen k modulu MU1221. K měřenému objektu (kovové tyči) je termočlánek připevněn pomocí kovové stahovací objímky.
- Modul MU1221 - externí měřicí modul s vysokým rozlišením. Potřebuje externí zdroj 24 V. Má velké možnosti rozsahů napěťových a termočláňkových.

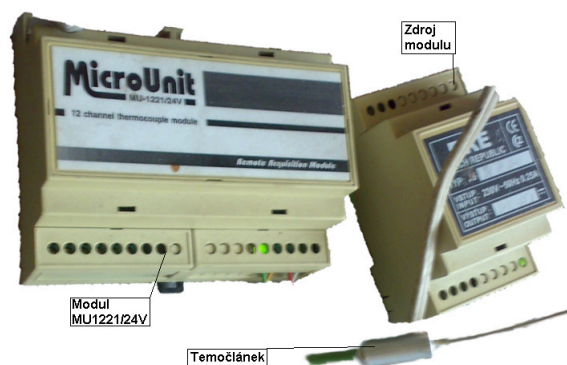
Analogové vstupy pracují na základech A/D převodníku AD7711. Veškeré řízení A/D převodníku a vstupů je provedeno pomocí procesoru AT89C52 firmy ATMEL. Ten je ovládán pomocí počítače s využitím sady makroinstrukcí. Ovládání je prováděno po komunikační lince.

Instalovaný firmware umožňuje samočinné měření veličin přivedených na analogové vstupy. Měření se provádějí podle požadavků, které byly předem naprogramovány. Získané naměřené hodnoty se ukládají do interní paměti RAM tohoto modulu. Vstupní hodnoty jsou z paměti RAM přeposlány do počítače po obdržení požadavku o ně.

Modul má implementován komunikační protokol AIBus-2. [7]

Modul obsahuje:

- galvanicky oddělené obvody A/D převodníku
- 6 diferenciálních vstupů
- 6 jednoduchých vstupů
- 2 digitální vstupy
- 2 digitální výstupy
- čidlo studeného konce termočláňku
- obvody komunikační linky RS485



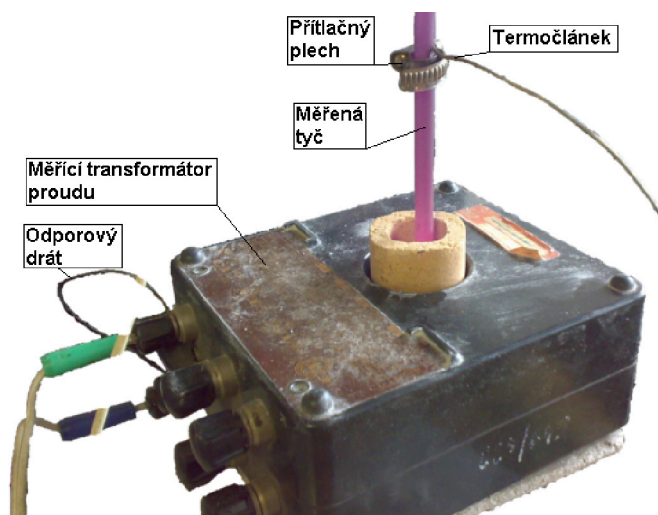
Obrázek 5.3: Modul MU1221 s napájecím zdrojem a termočláňkem

- Měřicí transformátor proudu (MTI) - má primární vinutí o malém počtu závitů (většinou jeden může být i více), které se zapojuje do serie s měřeným obvodem. Sekundární vinutí má velký počet závitů. Zátěž sekundárního vinutí transformátoru má malý odpor, takže transformátor pracuje většinou v blízkosti stavu nakrátko. Chyba měřené veličiny podléhá velikosti proudu naprázdno a chybě úhlu. Aby transformátor pracoval s udávanou přesností, musíme se držet parametrů na které je konstruován. Měřicí transformátor proudu nesmí být nikdy ve stavu naprázdno, mohlo by dojít k jeho zničení.

V našem případě byl použit víceúčelový měřicí transformátor proudu v průchozím provedení. Místo primárního vinutí je zde využito pouze působení elektromagnetického pole okolo měřeného objektu (tyče). Materiály ani dokumenty k tomuto měřicímu transformátoru proudu nebyly k dispozici. Jediné informace které jsme k němu získali byli přímo na štítku, podle kterého má transformátor převod $500 \div 2500 \text{ A} / 5 \text{ A}$. Pro přesné zjištění převodu musí být použit jiný měřicí přístroj (klešťový ampérmetr nebo jiný měřicí transformátor se známými parametry), důležité pro kontrolu správnosti použitých konstant v programu.

Z důvodu převedení proudu (výstupní veličina měřicího transformátoru proudu) na napětí je výstup MTI vybaven propojením z odporového materiálu (odporový drátek). Je možno použít i jiný způsob, tenhle je ale nejlevnější a dostačující. Materiál drátku musel být vybrán z materiálu, který má minimální závislost odporu na teplotě a to z důvodu stability převodu během měření. Dalším parametrem na který musíme dávat pozor je maximální proud tekoucí tímto drátkem. Velikost maximálního proudu je 5 A, protože to je maximální výstupní proud MTI. Z důvodu vhodných vlastností byl použit konstantanový drát.

Další úpravou která byla na MTI provedena je tepelné odizolování mezi obalem transformátoru a ohřívanou tyčí. Je provedena termoizolační keramickou trubkou, která byla vsunuta do mezery transformátoru. Zabraňuje tepelnému poškození obalu MTI.



Obrázek 5.4: Měřicí transformátor proudu a upevnění termočláneku

- PCI 1052 - je komunikační karta, která má dva porty standardu RS-485. Slouží jako

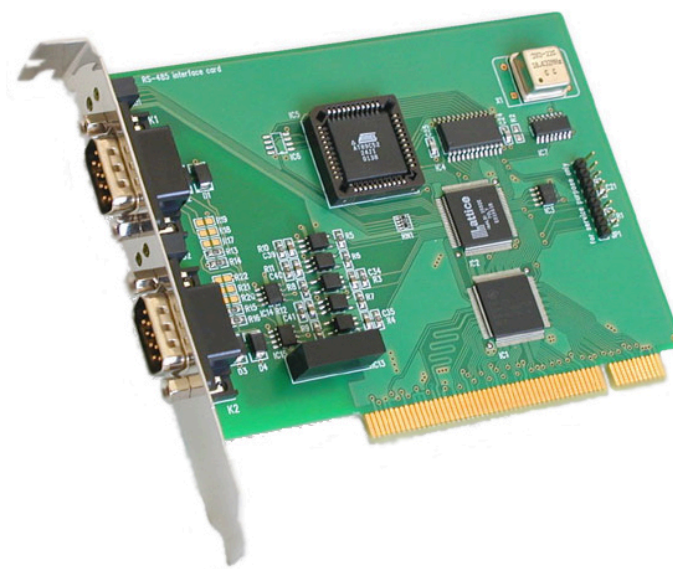
podpora pro stavebnice externích modulů distribuovaných systémů monitorování a řízení technologických procesů serie MicroUnit.

Předností této karty je autonomní obsluha komunikační linky, zjednodušená je i podpora ze strany aplikačního programu. Není třeba zvláštních nároků na přesné časování RS-485 s AIBus-2. Tato karta musí být instalována do PCI slotu počítače, který podporuje 5 V napájení a frekvenci 33 MHz.

PCI-1052 obsahuje:

- řídicí mikropočítač s integrovaným řadičem komunikační linky a dvojími opticky oddělenými budiči standardu RS-485
- dvojbránovou paměť pro obousměrný přenos příkazů a dat mezi počítačem a řídicím mikropočítačem umožňující současný oboustranný přístup
- programovatelnou logiku přerušení se širokou podporou kanálů přerušení
- firmware s podporou komunikačního protokolu AIBus-2

Tato karta je v laboratorním modelu použita ke komunikaci s modulem MU1221. Propojením těchto zařízení (termočlánek, modul MU1221, PCI-1052 vložená do PC) získáme měřicí soustavu pro měření teploty.[9]

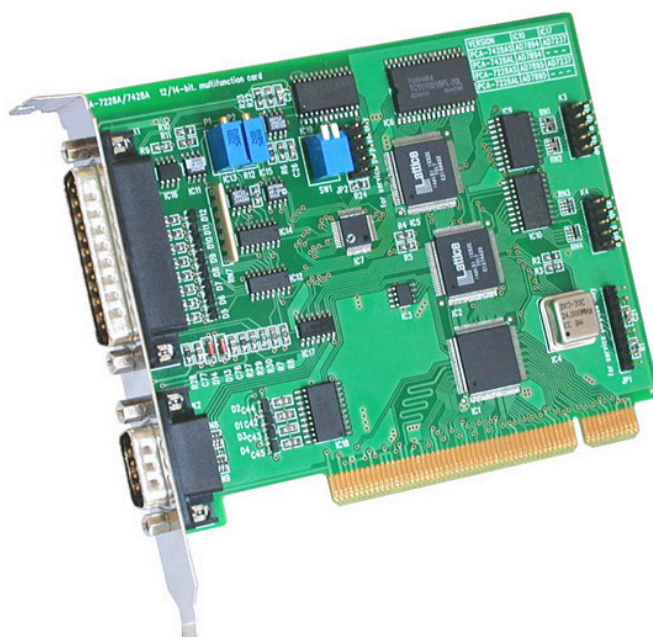


Obrázek 5.5: Rozšiřující PC karta PCI 1052

- PCA 7228AS - je to PC karta. Slouží pro tvorbu automatizovaných systémů v laboratořích a průmyslu. Karta je jednoduše nastavována pomocí programu. Všechny funkce až na pár výjimek jsou ovládány pomocí softwaru. Pro použití této karty je nutno mít osobní počítač vybaven PCI slotem s napájením 5 V a frekvencí 33 MHz. Parametry karty: typ ADC 12 bitů / 100 kHz, počet DAC 2x12 bit, datový zásobník 64 kB. [8]

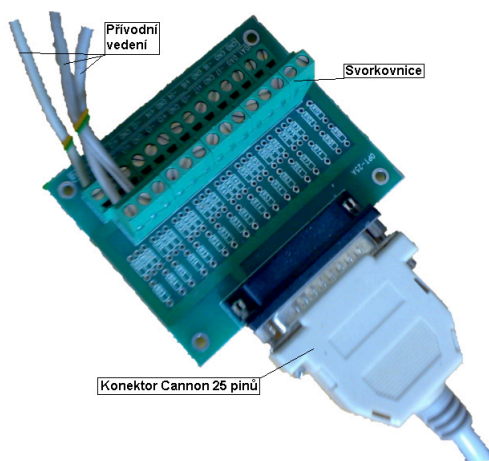
V laboratorním modelu je tato karta použita při měření napětí a proudu. Napětí je měřeno přímo a proud je měřen měřicím transformátorem proudu a pomocí odpo-

rového drátku převeden na napětí. Obě tyto veličiny jsou na kartu připojeny pomocí speciální svorkovnice.



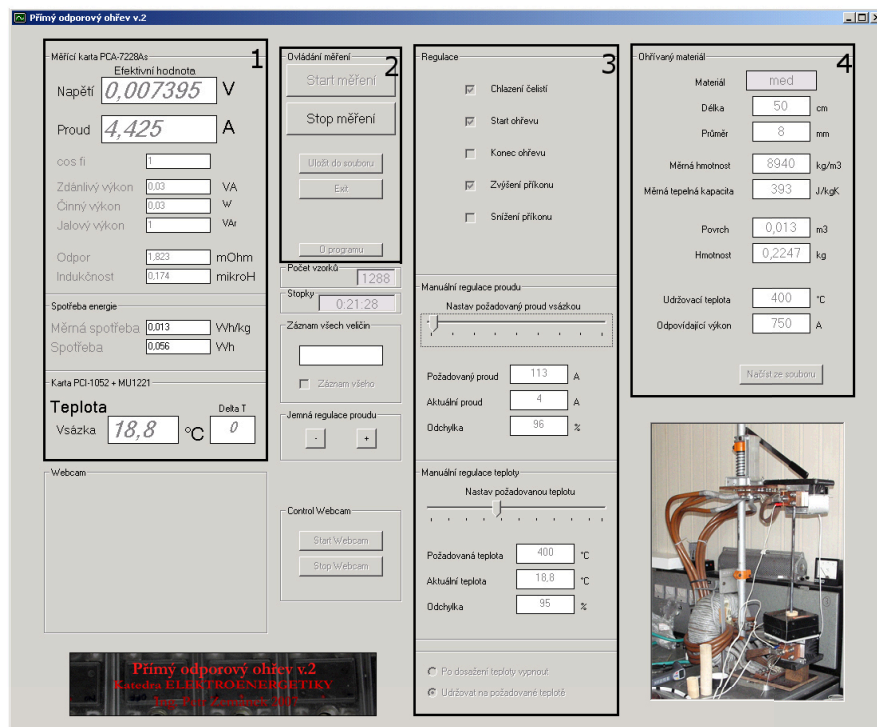
Obrázek 5.6: Rozšiřující PC karta PCA 7228AS

- Svorkovnice - slouží k převedení přírodních vedení (drátové vedení z měřicí strany, u měření proudu z měřicího transformátoru proudu a u měření napětí z čelistí, které drží tyč) na standardní 25 pinový konektor Cannon. Přírodní vedení musí být připojené na správné svorky podle manuálu karty.



Obrázek 5.7: Svorkovnice

- Počítač - slouží k ukládání a zpracování dat získaných pomocí přídavných karet. Pro měření je třeba použít speciální software navržený pro tento účel.
- Software (program) - jeho úkolem je zpracovat a uložit naměřená data na pevný disk počítače. Používá se program Přímý odporový ohřev v.2, jeho autorem je Ing. Petr Zemánek.



Obrázek 5.8: Program přímý odporový ohřev v.2

Na obrázku jsou vyznačeny čtyři části:

1. Část ve které jsou zobrazovány měřené a dopočítávané parametry.
 2. Ovládání programu. Spouštění a zastavování měření. Ukládání naměřených dat.
 3. Nastavování automatické regulace.
 4. Nastavování parametrů vsázky. Slouží k výpočtu dopočítávaných veličin.
- Termokamera (ThermaCAM E45) - slouží ke kontrole správného zaizolování tyče. Dále jde použít k snímání rozložení teploty na tyči. Termokamera snímá pomocí FPA (nechlazený bolometr) detektoru s rozlišením 160x120 pixelů. Detektor dokáže snímat ve spektrálním rozsahu 7,5-13 μm . Termokamera má více nastavitelných rozsahů (-20 až +250 °C nebo +120 až +900 °C možné i další podle požadavků). Přesnost měření je ± 2 °C nebo ± 2 % ze snímané teploty. Snímaný obraz je je zobrazován na vestavěném 2,5"LCD displeji (16bitové barvy). K napájení slouží nabíjecí baterie Li/Ion nebo AC adaptér. [10]



Obrázek 5.9: Termokamera v kufříku s příslušenstvím

Kapitola 6

Experimentální měření

Jako hlavní část této diplomové práce bude provedeno experimentální měření na laboratorním modelu, který slouží k zkoumání přímého odporového ohřevu kovových tyčí. Měření budu provádět na plných tyčích kruhového průřezu, různého průměru, různé délky a vyrobených z různého materiálu. Budu testovat vliv parametrů tyčí na ohřev. Dále budu sledovat vliv okolního prostředí a způsobu napájení na přímý odporový ohřev. Množství a parametry tyčí zvolím s ohledem na časovou náročnost.

Úkolem těchto měření je za pomoci získaných dat provést optimalizaci přímého odporového ohřevu.

6.1 Volba parametru optimalizace

Při volbě vhodných parametrů pro optimalizaci přímého odporového ohřevu jsem vycházel z energetické bilance tohoto typu ohřevu a to z rovnice 6.1 a 6.2.

$$P_{\Delta}t = mc_{\Delta}\vartheta + \alpha_c(\vartheta_t - \vartheta_0)S_{\Delta}t \quad (6.1)$$

$$Q = Q_u + Q_z \quad (6.2)$$

Konstanty, jako možnost při volbě parametrů pro optimalizaci, jsem vypustil. Z tohoto důvodu jsem jako parametr nepoužil m , c ani S . Jako parametr pro optimalizaci mohou být použity minimální ztráty elektrické energie, maximální akumulovaná energie nebo minimální spotřeba při ohřevu tyče na zvolenou teplotu. Já jsem jako nejvhodnější zvolil minimální spotřebu při ohřevu tyče na zvolenou teplotu.

6.2 Volba parametru vsázky a izolace

Parametry vsázky musí být vybrány s ohledem na možnosti laboratorního modelu. Tyče mohou být z jakéhokoliv materiálu vhodného pro přímý odporový ohřev. Fyzikální parametry vsázky musím vybírat s ohledem na tvar a maximální průměr čelistí, do kterých je tyč umístěna. Z tohoto důvodu musí být kruhového průřezu o maximálním průměru 20 mm. Tyče s menším průměrem jsou do těchto čelistí vkládány za pomoci speciálních vložek, které se vsunou mezi tyč a čelisti. Při měření mohou použít tyč plnou i dutou (trubku). Při volbě délky tyče musím brát ohled na možnosti

zvedacího mechanismu, na kterém jsou čelisti upevněny. Teoretická maximální délka tyče je okolo 70 cm.

Při výběru množství tyčí pro experimentální měření přímého odporového ohřevu jsem musel počítat i s časovou náročností jednoho ohřevu na zvolenou teplotu. Předpokládal jsem, že jeden ohřev a zchlazení tyče na počáteční teplotu bude trvat okolo jedné hodiny. Při vyšším množství testovaných proudů (3-4 proudy na jednu tyč) a při testování vlivu prostředí a regulace na ohřev mi vyšlo šestnáct hodin na měření jedné tyče. Z tohoto důvodu jsem zvolil tři různé materiály a tři průměry tyčí. Délka tyčí bude pro všechny měření stejná. Je to z důvodu problému vzniklých při nastavování výšky čelistí (modelu zatuhl mechanismus pro nastavování výšky a jedna úprava výšky trvala téměř dvě hodiny). Předpokládaná doba trvání měření je tedy celkově 96 hodin. Pro měření mi byla vyhrazena laboratoř na dva týdny, proto se během měření může snížit počet měření.

Vybrané tyče pro měření jsou vypsány v tabulce 6.1.

Materiál	Průměr [mm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]	Označení
Měď	8	0.5	0.221	E-Cu Tvrdá
Měď	10	0.5	0.350	E-Cu Tvrdá
Měď	12	0.5	0.501	E-Cu Tvrdá
Mosaz	8	0.5	0.211	CuZn40Pb2
Mosaz	10	0.5	0.327	CuZn40Pb2
Mosaz	12	0.5	0.474	CuZn40Pb2
Ocel	8	0.5	0.196	S235JRG2C+C
Ocel	10	0.5	0.309	S235JRG2C+C
Ocel	12	0.5	0.440	S235JRG2C+C

Tabulka 6.1: Vybrané tyče kruhového průřezu

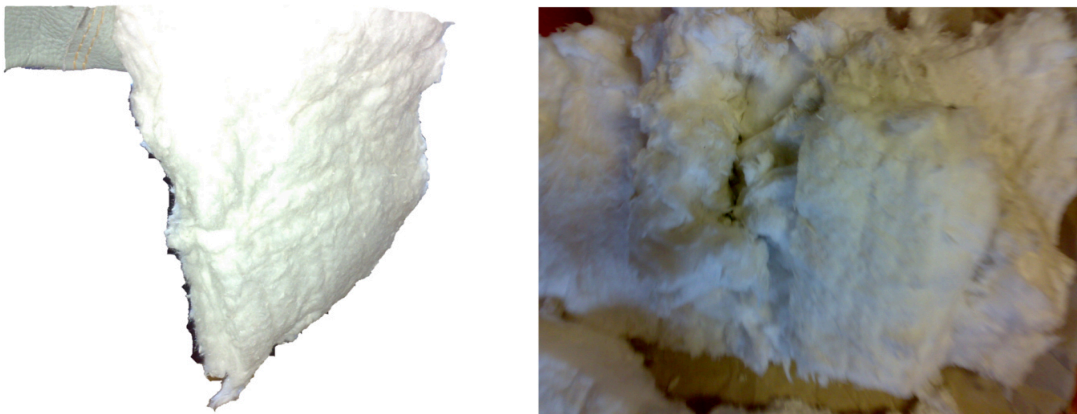


Obrázek 6.1: Použité tyče seřazené podle tabulky uložené na izolačním materiálu

Při měření bude, pro porovnání vlivu okolního prostředí na přímý odporový ohřev, použita tepelná izolace. Předpokládám, že mohu dosáhnout teploty 700 °C a vyšší. Proto musím zvolit takovou izolaci, která tyto teploty vydrží, nebo zastavit ohřev před dosažením kritické teploty.

Na trhu se nachází velké množství tepelně izolačních materiálů v různém provedení (trubky, desky, rohože, papír). Jako nejvhodnější v našem případě se být zdají trubky nebo rohože. Příkladem může být materiál s názvem Insulfrax v provedení tvarovky s kritickou teplotou 1200 °C nebo Fibefrax S (sibal STANDART). Jedná se o rohož s odolností do teploty 1250 °C.

Při měření jsem použil sibal, protože má dostatečnou teplotní odolnost, jednoduché zpracování a byl dostupný ze skladů školy.



Obrázek 6.2: Izolační materiál

6.3 Popis měření

Měření jsem provedl na laboratorním modelu popsaném v kapitole 5. Měřenou tyč jsem umístil do laboratorního modelu tak, aby spodní čelist visela asi 1 cm nad podložkou. Tím jsem snížil možnost deformace tyče v důsledku tepelného roztahení. Pro měření teploty jsem do středu tyče umístil termočlánek a zajistil ho kovovým páskem pro dobrý přenos tepla.

Před začátkem měření jsem spustil a nastavil v počítači program Přímý odporový ohřev v.2 . V programu jsem načtl parametry vsázky, to je nutné i v případě, že nebudu využívat dopočítávané veličiny. Jako další krok jsem připojil napájení zdroje a manuálně nastavit požadovanou hodnotu proudu. Po dosažení požadované teploty je nutno odpojit zdroj napájení, snížit nastavenou hodnotu na minimum (na regulaci, regulace funguje i při odpojení napájení transformátoru), zastavit měření (v programu) a pak jsem uložil naměřená data. Pro další měření jsem musel ochladit tyč na počáteční teplotu.

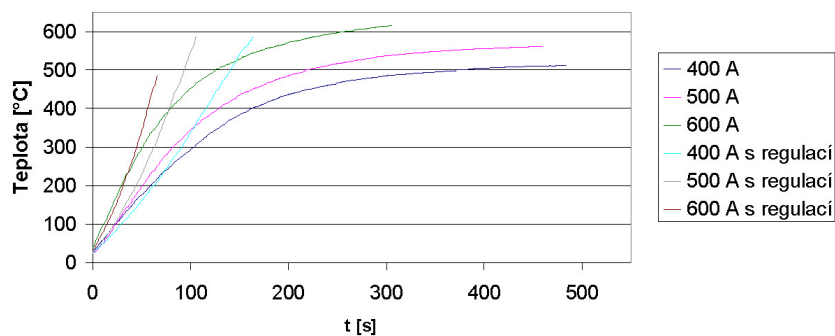
Kombinaci měřicí pracoviště a program jsem použil pouze pro měření napětí, proudu, teploty a účinníku. Ostatní veličiny jsem dopočítal pomocí vzorců zmíněných v teoretické části.

6.4 Měření na ocelových tyčích

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků. Obsah uhlíku oceli musí být menší než 2,11 %, pokud je obsah uhlíku větší, jedná se o litinu. V současnosti se vyrábí mnoho druhů oceli,

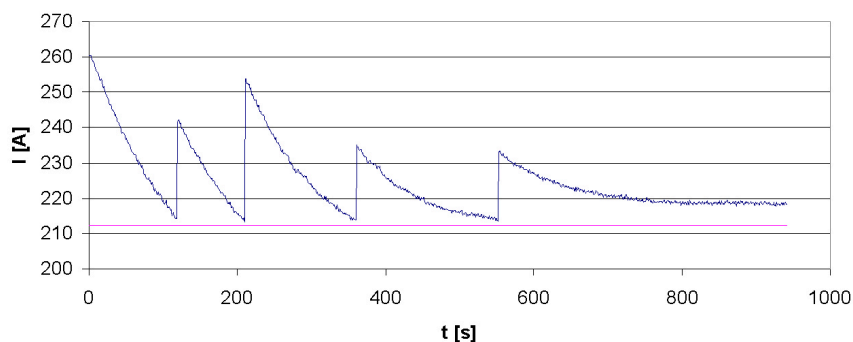
kteřé se od sebe liší složením, strukturou a vlastnostmi. Ocel má velkou škálu využití (konstrukční ocel, ocel na elektrotechnické plechy, nástrojová ocel a tak dál).

Provedl jsem měření přímého odporového ohřevu na třech ocelových tyčích různých průměrů s kruhovým průřezem při proudech 400, 500 a 600 A (nastavení přesného proudu je problém z důvodu nepřesné regulace, nastavené hodnoty se zvoleným jenom blíží). Všechny tyče jsem změřil bez regulace, s tepelnou izolací i bez tepelné izolace. Navíc jsem provedl měření s neizolovanou tyčí o průměru 8 mm s regulací.

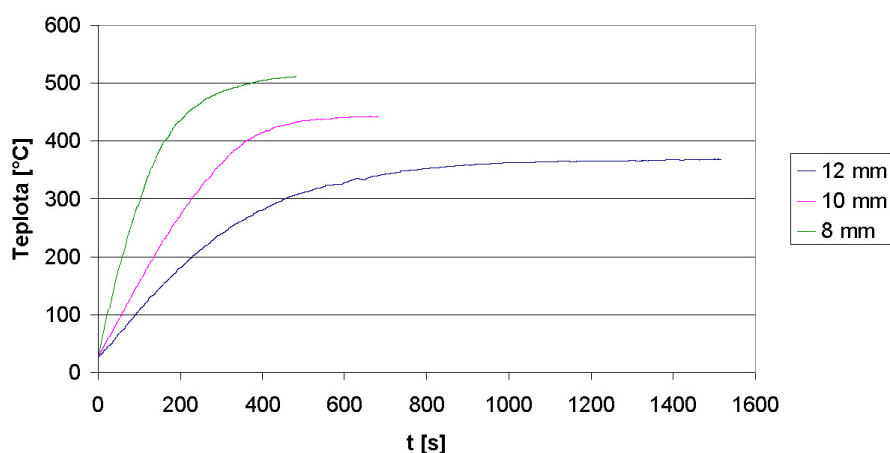


Obrázek 6.3: Vliv dodaného výkonu na průběh ohřevu ocelových tyčí o průměru 8 mm

Na obrázku 6.3 vidíme průběhy ohřevu bez regulace a s použitím regulace. Regulační systém se snaží udržet konstantní proud, který se během ohřevu snižuje. (Bez regulace je hodnota proudu nastavena na počátku měření, s regulací se proud pohybuje v rozmezí $\pm 15\%$ po celou dobu měření). Průběh proudu při použité automatické regulaci je vidět na obrázku 6.4. Vidíme, že automatická regulace řízená pomocí programu Přímý odporový ohřev v.2 přes spínací pole reaguje na pokles proudu pod hodnotu 15 % automatickým zvýšením proudu. Hranice 15 % je na obrázku vyznačena růžovou čarou. Velikost zvýšení proudu nemá žádnou nastavenou hodnotu (nemá konstantní velikost), na průběhu je vidět náhodné zvyšování proudu.

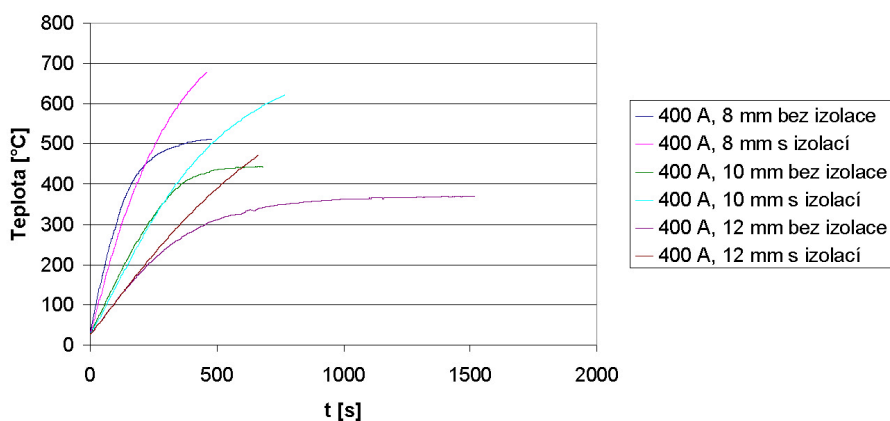


Obrázek 6.4: Průběh proudu při použití automatické regulace, ohřev ocelové tyče s průměrem 8 mm při nastavení proudu 250 A



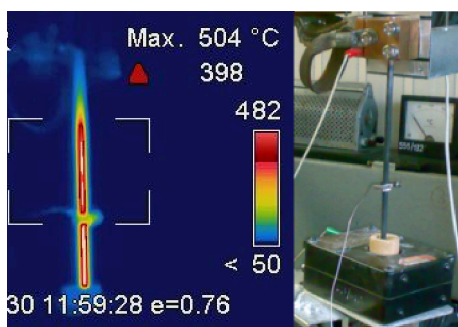
Obrázek 6.5: Vliv průměru ocelových tyčí na průběh ohřevu

Obrázek 6.5 znázorňuje průběh ohřevu ocelových tyčí s různým průřezem při počátečních hodnotách proudu 400 A. Protože tyče mají různé průměry, mají také různé odpory. Tyč s nejmenším průměrem má největší odpor, to znamená, že při stejném proudu pro všechny průměry má tato tyč největší úbytek napětí.

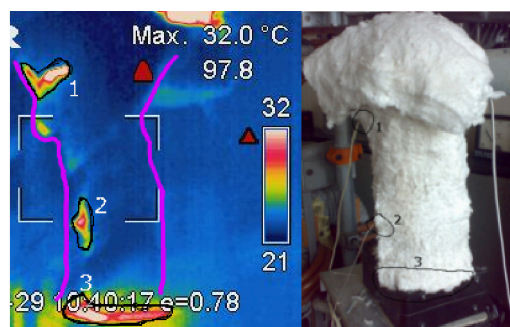


Obrázek 6.6: Vliv prostředí na průběh ohřevu ocelových tyčí

Jedním s testovaných parametrů byl vliv prostředí na průběh přímého odporového ohřevu. Měření jsem provedl na třech průměrech tyčí při třech různých proudech. Pro simulaci změny parametrů prostředí jsem měření provedl na tyčích s tepelnou izolací a bez tepelné izolace. Na obrázku 6.6 vidíme výsledné naměřené průběhy pro proud 400 A při průměrech tyčí 12, 10 a 8 mm. Výsledné naměřené průběhy ukazují, že při snížení odvodu tepla do okolí (tepelně izolované tyče mají menší koeficient přestupu tepla do okolí prouděním a zářením α_c) dosahují tyče mnohem vyšších maximálních teplot. Jako důkaz snížení odvodu tepla do okolí jsem použil termovizní měření.



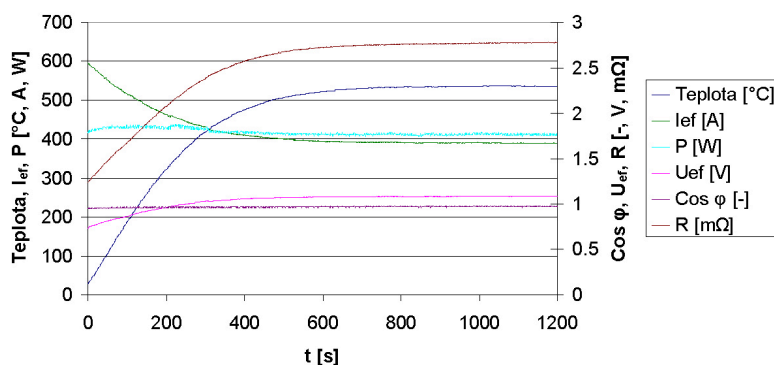
Obrázek 6.7: Normální a termovizní snímek ocelové tyče ohřáté na 500 °C



Obrázek 6.8: Normální a termovizní snímek ocelové tyče zaizolované a ohřáté na 500 °C

Na obrázku 6.7 je za použití termovizní kamery a fotoaparátu vyobrazená neizolovaná tyč ohřátá na 500 °C. Emisivita povrchu je pro různé teploty jiná, proto jsem kalibraci prováděl podle známé teploty naměřené termočlánkem. vidíme že termovize ukazuje maximální teplotu povrchu 504 °C.

Na obrázku 6.8 je za použití termovizní kamery a fotoaparátu vyobrazená zaizolovaná tyč ohřátá na 500 °C. Pro lepší viditelnost jsem obrys izolačního materiálu zvýraznil fialovou barvou, protože jinak je z důvodu velmi malého rozdílu teploty povrchu izolace a okolí špatně viditelný. I když je teplota povrchu tyče uvnitř izolace 500 °C termokamera snímá pouze teplotu povrchu izolace, která je maximálně 32 °C. Tato teplota je ovšem naměřena v místech, kde dochází k odvodu tepla vedením. Místa byla označena čísly. Číslo jedna označuje odvod tepla vedením okolo a povrchem měřicího vedení pro měření napětí. Dvojka označuje místo odvodu tepla v okolí termočlánku a trojka zobrazuje odvod tepla povrchem obalu měřicího transformátoru proudu. Teplota povrchu izolačního materiálu v místech kde nedochází k odvodu tepla je blízká teplotě okolí.



Obrázek 6.9: Průběh činného výkonu, efektivního proudu, efektivního napětí, $\cos \varphi$, teploty a odporu v závislosti na čase při ohřevu ocelové tyče o průměru 12 mm

Při těchto experimentech jsem prováděl měření tří veličin. Tyto veličiny jsou napětí, proud a teplota. Jelikož napětí a proud jsou střídavé veličiny, musí být výsledné hodnoty přepočítány

na efektivní hodnoty. Toto se provádí automaticky programem Přímý odporový ohřev v.2 podle naprogramovaných vzorců 6.3 a 6.4.

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{1203} \sum_{k=1}^{1203} u_k^2} \quad (6.3)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{1203} \sum_{k=1}^{1203} i_k^2} \quad (6.4)$$

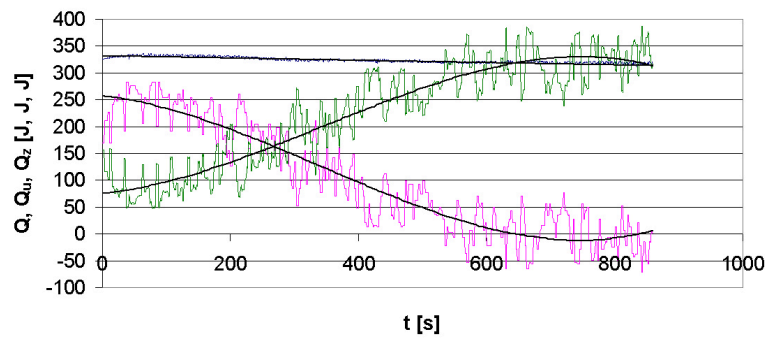
Další veličinu, kterou program automaticky dopočítává je $\cos\varphi$. Ten program počítá tak, že změří průběh napětí a proudu (jako střídavé veličiny) a z rozdílu času, kdy veličiny projdou nulou spočítá $\cos\varphi$.

Z takto získaných veličin potom mohou dopočítat veličiny jako je odpor tyče a činný výkon využitý na ohřev tyče.

$$P = U_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad (6.5)$$

$$R = \frac{U_{ef}}{I_{ef}} \quad (6.6)$$

Průběhy těchto veličin jsou zobrazeny na obrázku 6.9.



Obrázek 6.10: Průběh energií při ohřevu ocelové tyče o průměru 12 mm proudem 500 A

Důležitými veličinami jsou také užitečné teplo využitě k ohřevu vsázky a tepelné ztráty vzniklé odvodem tepla do okolí. K jejich získání využívám tyto vzorce:

$$Q = mc_{\Delta}\vartheta + \alpha_c(\vartheta_t - \vartheta_0)S_{\Delta}t \quad (6.7)$$

$$Q = P_{\Delta}t \quad (6.8)$$

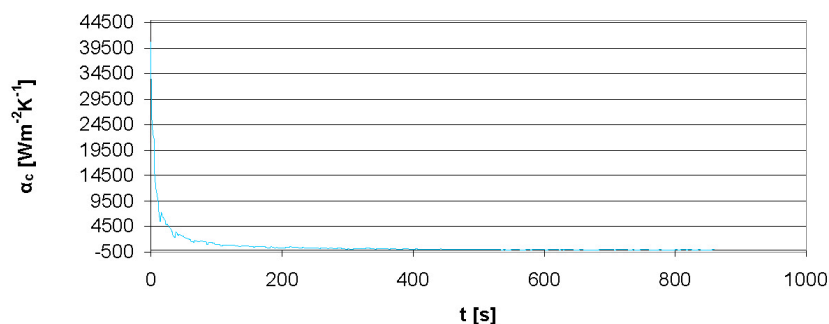
$$S = 2\pi r(r + v) \quad (6.9)$$

$$Q_u = mc_{\Delta}\vartheta \quad (6.10)$$

$$Q_z = \alpha_c(\vartheta_t - \vartheta_0)S_{\Delta}t \quad (6.11)$$

$$Q_z = Q - Q_u \quad (6.12)$$

$$\alpha_c = \frac{P - Q_u}{(\vartheta_t - \vartheta_0)S} \quad (6.13)$$



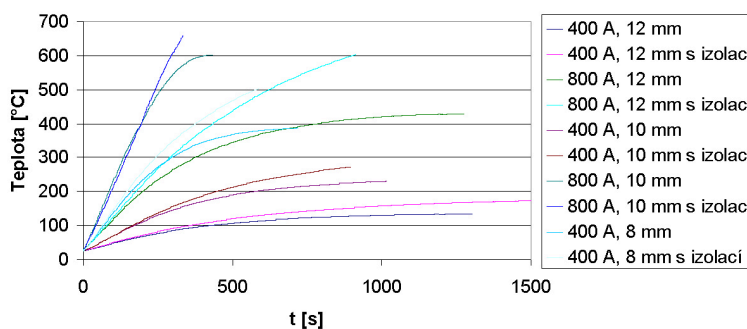
Obrázek 6.11: Průběh vypočítaného celkového součinitele přestupu tepla při ohřevu ocelové tyče o průměru 12 mm proudem 500 A

6.5 Měření na mosazných tyčích

Mosaz je slitina mědi a zinku, část zinku může být nahrazená jiným kovem. Má široké pole využití v jemné mechanice (ozubená kola), elektrotechnice a dalších odvětvích. K velké přednosti mosazi patří dobrá obrobitelnost, koroziodolnost a vodivost. Teplota tavení je 1100 °C. Ke změkčení slitiny při tváření za studena se používá žhání. Slouží ke změně vlastností tak, aby mohl být hotový výrobek dále zpracováván. Mosaz se za studena žhře při teplotách v rozmezí 245 až 650 °C.

Měření jsem prováděl na mosazných tyčích o průměru 8, 10 a 12 mm. U tyčí s průměrem 10 a 12 mm jsem provedl ohřev při proudech 400, 600, 700 a 800 A s tepelnou izolací a bez tepelné izolace. U průměru 8 mm pouze proudy 400, 600 a 700 A s tepelnou izolací a bez tepelné izolace. U mosazných tyčí jsem neměřil průběh ohřevu s použitím regulace.

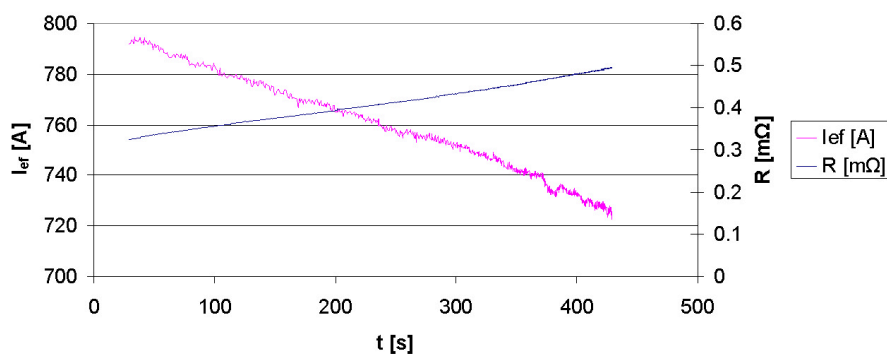
Průběhy ohřevu mají téměř stejný tvar jako ohřev ocelových tyčí, proto jsou zde vykresleny jen některé grafy.



Obrázek 6.12: Vliv dodaného výkonu a izolace na průběh ohřevu mosazných tyčí o průměru 8, 10 a 12 mm

Na obrázku 6.12 je vyobrazen průběh ohřevu mosazných tyčí, vidíme na něm že tyč o průměru 12 mm při proudu 400 A nedosáhla ani teploty 150 °C. Je to vlivem malé rezistivity materiálu.

Z tohoto důvodu jsem zvolil vyšší proudy pro měření na mosazných tyčích.



Obrázek 6.13: Průběh odporu mosazné tyče 12 mm a proudu tekoucím touto tyčí na teplotě

Důvod proč jsem na těchto tyčích neprovedl měření s použitím automatické regulace je malý pokles proudu. Automatická regulace programu Přímý odporový ohřev v.2 má nastavenou malou citlivost (± 15 % odchylky od nastavené hodnoty proudu). Na obrázku 6.13 je vidět, že pokles proudu je při 430 °C, které jsem dosáhl na mosazné tyči s průměrem 12 mm a proudem 800 A, menší než 15 %. Automatická regulace by v tomto případě vůbec nereagovala.

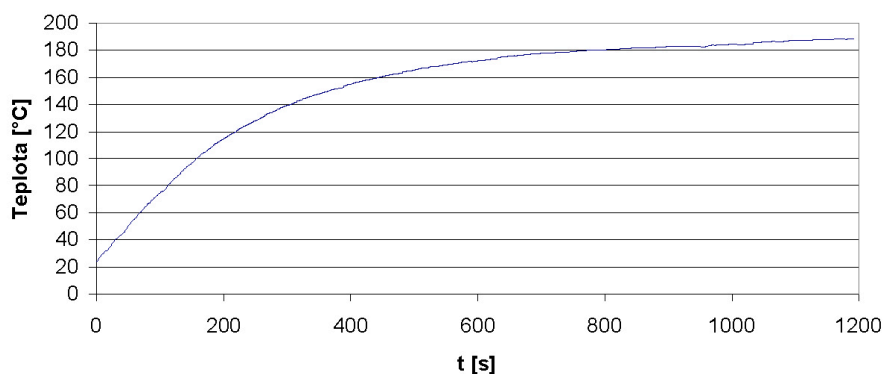


Obrázek 6.14: Mosazná tyč při teplotě 600 °C po odmotání izolace

6.6 Měření na měděných tyčích

Měď se v ryzí formě v přírodě téměř nevyskytuje. V přírodě se většina mědi nachází ve formě sloučenin s jinými kovy. Na vzduchu je měď málo stálá, při působení vlhkosti dochází k pokrytí povrchu materiálu oxidem ohličitým (měděnka). Je to kov načervenalé barvy, který má vysokou elektrickou a tepelnou vodivost. Tvářitelnost mědi je velmi dobrá, minimální teploty pro tváření jsou kolem 500 - 600 °C.

Pro měření na měděných tyčích jsem předpokládal použití průměrů 8, 10 a 12 mm. Proudly měly být nastavené na hodnotu 400, 500 a 600 A, ale nejprve jsem provedl testovací měření na tyči o průměru 8 mm s proudem 600 A. Předpokládal jsem, že to bude měření, při kterém dojde k největšímu ohřevu. Výsledný průběh je zobrazen na obrázku 6.15.



Obrázek 6.15: Průběh ohřevu měděné tyče o průměru 8 mm při nastavení proudu 600 A

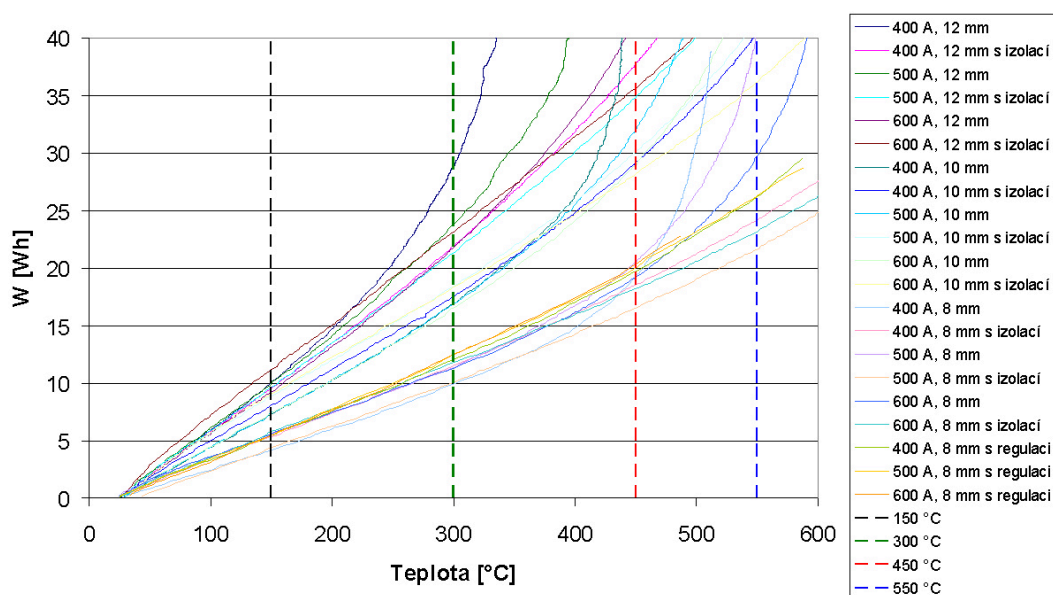
Z testovacího měření jsem ovšem zjistil, že se měděná tyč neohřála ani na teplotu 200 °C. Ostatní měření jsem proto neprováděl, výsledné maximální teploty by byly nižší než při testovacím měření. Důvodem nízké dosažené teploty je vysoká vodivost materiálu, díky které byl dodávaný výkon do vsázky malý. Vzhledem k těmto poznatkům jsem označil zvolené měřené měděné tyče za nevhodné pro přímý odporový ohřev na tomto laboratorním modelu.

Kapitola 7

Optimalizace přímého odporového ohřevu

Jak už jsem se v předchozí kapitole zmínil, optimalizaci můžeme provádět podle více možných parametrů. Mnou zvoleným parametrem je minimální činný příkon do vsázky pro ohřátí na zvolenou teplotu. Tento parametr zjistím porovnáním výsledků získaných měření na laboratorním modelu. Porovnávání budu provést na tyčích z různých materiálů pro více průměrů při různém napájení a vlivu prostředí. Zvolené teploty, při kterých budu toto dělat, jsou: 300 °C, 450 °C a 550 °C.

7.1 Ocelové tyče



Obrázek 7.1: Průběh spotřebované elektrické energie na dosažení teploty všech ocelových tyčí

Z naměřených hodnot (napětí, proud, $\cos\varphi$) mohu vypočítat elektrickou energii spotřebovanou na ohřev tyčí. Z průběhů, které jsou vyobrazeny na obrázku 7.1 mohu určit vliv fyzikálních parametrů tyče, velikosti a regulace proudu nebo okolního prostředí. Abych mohl mezi sebou výsledné hodnoty porovnat, musím je přepočítat na měrnou spotřebu. Vzorce použité pro výpočet:

$$W = \frac{\sum_{n=1}^x P}{3600} \quad (7.1)$$

$$W_m = \frac{\sum_{n=1}^x P}{3600m} \quad (7.2)$$

Měrnou spotřebu jsem uložil do tabulky, ze které jsem vytvořil přehledné grafy.

Materiál	Průměr [mm]	Izolace	Regulace	Proud[A]	Teplota [°C]	Měrná spotřeba [Wh/kg]
Ocel	12	ne	ne	400	300	65.64
Ocel	12	ne	ne	400	450	-
Ocel	12	ne	ne	400	550	-
Ocel	12	ano	ne	400	300	49.96
Ocel	12	ano	ne	400	450	85.88
Ocel	12	ano	ne	400	550	-

Tabulka 7.1: Příklad uspořádání tabulky

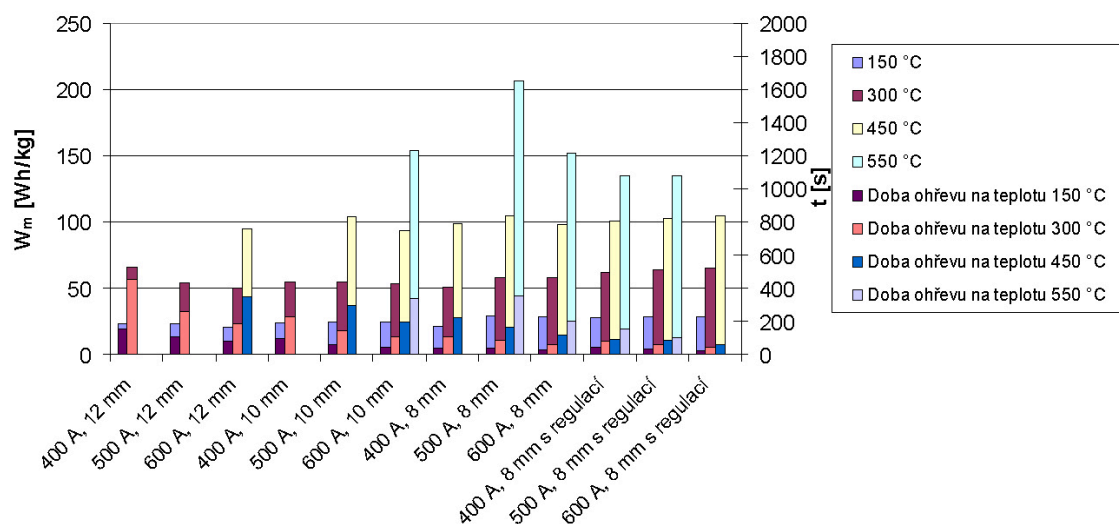
7.1.1 Vliv velikosti napájecího proudu s regulací a bez regulace na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

Z naměřených a vypočtených veličin jsem sestavil graf. Na tomto grafu je vidět požadovaná závislost pro tři průměry tyčí (8, 10 a 12 mm). Průběhy pro tyče 10 a 12 mm mají předpokládaný průběh. Při zvyšování napájecího proudu klesá měrná spotřeba a čas pro dosažení požadované teploty, vzrůstá dosažená maximální teplota. Jako konkrétní případ můžeme uvést ohřev ocelové tyče o průměru 12 mm na teplotu 300 °C. Při proudu 400 A je spotřebováno 65.64 Wh/kg, ohřev trvá 457 s. Při proudu 600 A je spotřebováno 49.66 Wh/kg, ohřev trvá 182 s. Zvýšením proudu o 50 % se snížila spotřeba o 24.35 % a doba ohřevu o 60 %.

V případě ohřevu 8 mm tyče průběhy neodpovídají předpokladům. Čas ohřevu se podle předpokladu zkracuje, dochází ovšem k nárůstu měrné spotřeby. Při proudu 400 A je spotřebováno 51.02 Wh/kg, ohřev trvá 104 s. Při proudu 600 A je spotřebováno 58.17 Wh/kg, ohřev trvá 63 s. Zvýšením proudu o 50 % se zvýšila spotřeba o 14 % a doba ohřevu se zkrátila o 40 %. Tato anomálie byla způsobena nepřesností při měření. Předpokládám, že chyba vznikla při měření s proudem 400 A nebo 500 A.

Při měření za použití napájení s automatickou regulací (pouze 8 mm tyč) jsem zjistil, že oproti ohřevu bez regulace stoupne měrná odebraná energie a maximální dosažená teplota, ale sníží se doba potřebná k ohřevu. Na tyči 8 mm při proudu 600 A došlo ke zvýšení spotřeby o 12.4 % což je 7,2 Wh/kg a snížení doby ohřevu o 17 s tedy 27 %.

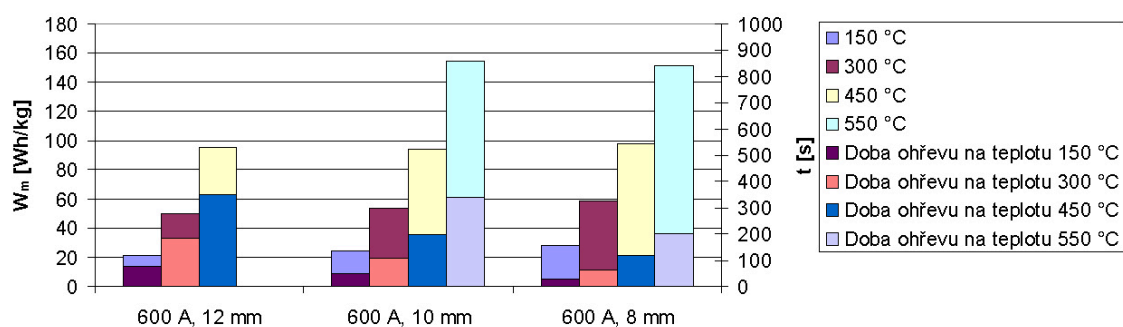
Všechny uvedené konkrétní případy jsou pro ohřev tyče na teplotu 300 °C.



Obrázek 7.2: Vliv velikosti napájecího proudu s regulací a bez regulace na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.1.2 Vliv průměru tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

Pro zkoumání vlivu průměru tyče na spotřebu elektrické energie jsem použil vzorky měřené při proudu 600 A. Zjistil jsem, že při ohřevu tyčí menšího průměru spotřebujeme více energie, ale ohřev trvá kratší dobu. Vzorku s průměrem 8 mm trval ohřev na teplotu 300 °C 63 sekund, spotřeboval při tom 58.17 Wh/kg. Vzorek s průměrem 12 mm spotřeboval na tento ohřev 49.66 Wh/kg a trval 182 sekund. Při volbě tyče s průměrem 12 mm tedy spotřebujeme o 14.63 % energie méně, ale ohřev bude trvat o 188.8 % déle.

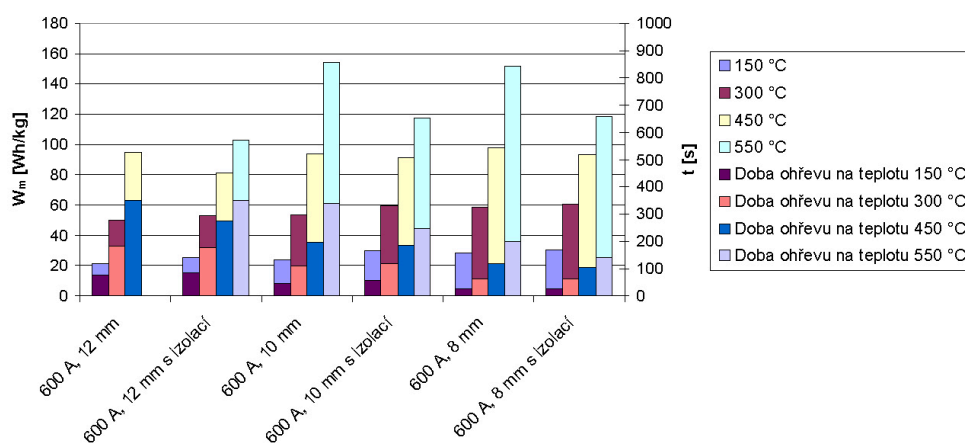


Obrázek 7.3: Vliv průměru tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.1.3 Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

Pro testování vlivu okolního prostředí na přímý odporový ohřev tyčí kruhového průřezu jsem použil hodnoty získané při měření tyčí umístěných v různých prostředích. V prvním případě byly tyče volně uloženy ve vzduchu, v druhém případě jsem použil tepelně izolační materiál. Tepelně izolačním materiálem byly před měřením tyče obalené. Tímto jsem se snažil nasimulovat prostředí, které sníží ztráty tepla odvodem do okolí. Z naměřených hodnot jsem potom sestavil graf. Použil jsem hodnoty získané při měření tyčí o průměru 8, 10 a 12 mm při nastaveném počátečním proudu 600 A. Na grafu je vidět, že ohřívání tyč s izolací má do určité teploty větší spotřebu elektrické energie a ohřev trvá delší dobu než bez izolace. Od určité teploty dochází k nárůstu spotřeby na neizolované tyči nad spotřebu izolované tyče. To znamená, že pro vyšší teploty je spotřeba a čas ohřevu pro izolované tyče nižší než pro neizolované.

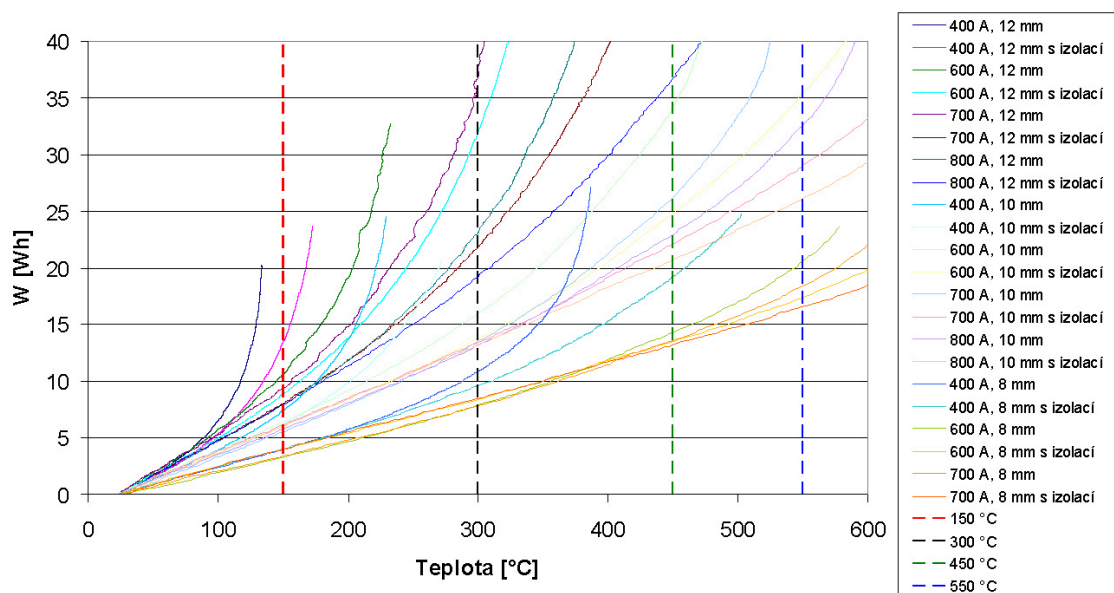
Jako konkrétní příklad z grafu mohu uvést ocelovou tyč 12 mm bez izolace. Při ohřevu na teplotu 300 °C spotřebuje 49.66 Wh/kg a ohřev trvá 182 sekund. Tyč s izolací spotřebovává při tomto ohřevu 52.87 Wh/kg po dobu 178 sekund. Při ohřevu na teplotu 450 °C, který trvá 350 sekund, je ovšem spotřeba neizolované tyče 94.99 Wh/kg. Izolovaná tyč se ohřívá jen 275 sekund a spotřebuje na to 81.19 Wh/kg.



Obrázek 7.4: Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.2 Mosazné tyče

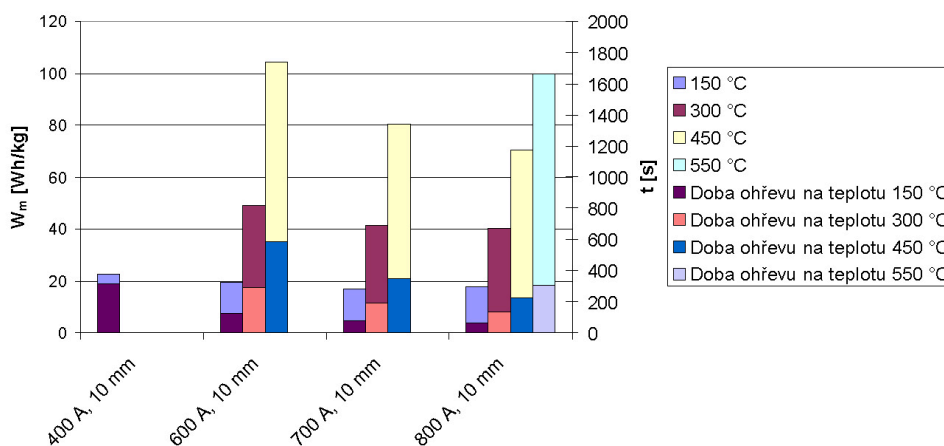
Při vyhodnocování vlivů na ohřev mosazných tyčí postupuji stejně jako u tyčí ocelových. Z naměřených hodnot vypočítám požadované veličiny a vytvořím grafy. Při měření na mosazných tyčích s průměrem 8, 10 a 12 mm jsem ovšem z důvodu velké vodivosti použil jiné proudy. Velikost počátečních proudů byla nastavena na 400, 600, 700 a 800 A u tyčí o průměru 10 a 12 mm. U tyčí s průměrem 8 mm jsem použil pouze počáteční proudy 400, 600 a 700 A. Průběhy spotřebované elektrické energie pro ohřátí tyčí na zvolené teploty (stejně jako u tyčí ocelových, z důvodu srovnání výsledků), jsou zobrazeny na obrázku 7.5.



Obrázek 7.5: Průběh spotřebované elektrické energie na dosažení teploty všech měděných tyčí

7.2.1 Vliv velikosti napájecího proudu bez regulace na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

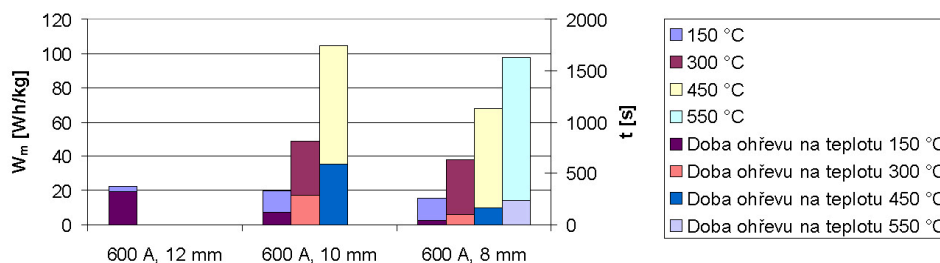
Postup je téměř stejný jako u ocelových tyčí, vypustil jsem pouze regulaci proudu, a to z důvodu malého poklesu proudu během ohřevu (proud v průběhu měření u většiny tyčí nepřekročil hranici $\pm 15\%$ nastaveného proudu, při které dochází k aktivaci regulace). Výsledné hodnoty byly zaneseny do grafu.



Obrázek 7.6: Vliv velikosti napájecího proudu bez regulace na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.2.2 Vliv průměru tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

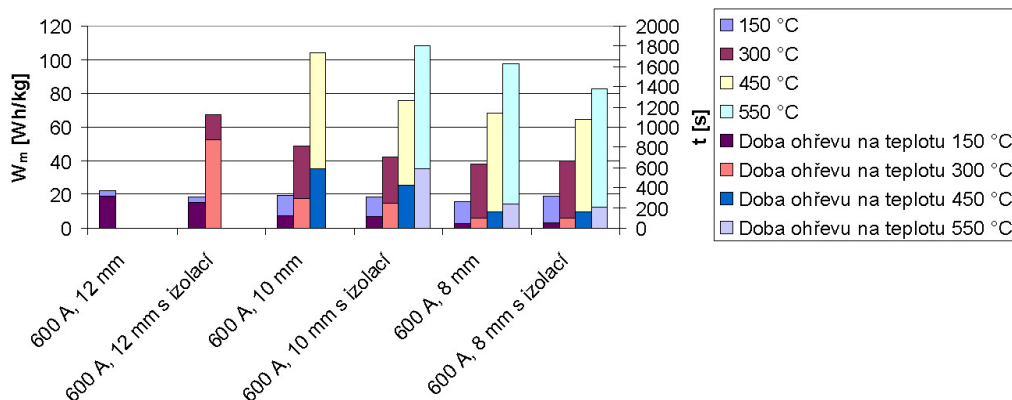
Postup řešení je popsán v kapitole 7.1.2. Pro sestavení grafu jsem zvolil hodnoty získané při měření s nastaveným proudem 600 A.



Obrázek 7.7: Vliv průměru tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.2.3 Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

Postup řešení je popsán v kapitole 7.1.3. Pro sestavení grafu jsem zvolil hodnoty získané při měření s nastaveným proudem 600 A. Na grafu je vidět odchylka od získaných hodnot při měření na ocelových tyčích. Ukazuje se, že při průměru tyče 10 a 12 mm se odběr energie po zaizolování vždy sníží. U tyče s průměrem 8 mm je odběr při teplotách do ohřevu na 300 °C nižší bez izolace. Při ohřevu nad 300 °C vychází odběr menší u tyčí zaizolovaných. Je to stejný výsledek jako jsem zjistil u ocelových tyčí.



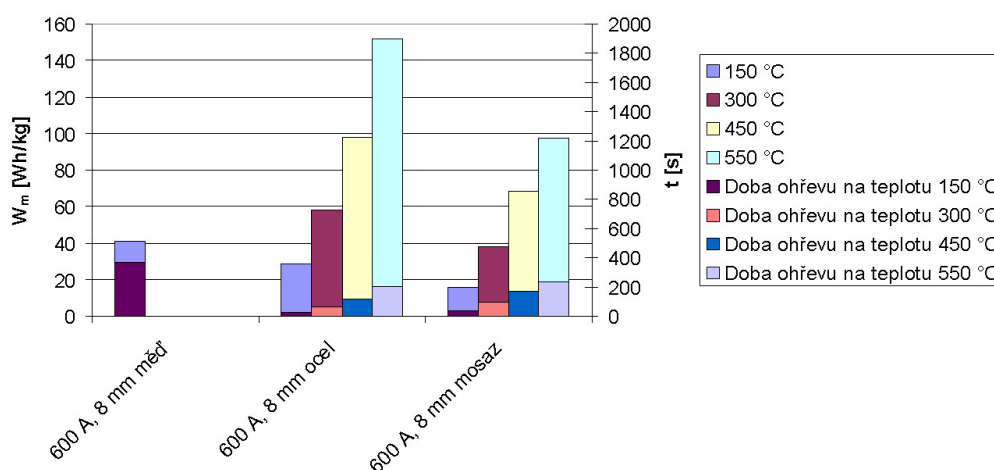
Obrázek 7.8: Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.3 Měděné tyče

Na měděných tyčích jsem provedl pouze jedno měření. Měřil jsem měděnou tyč s průměrem 8 mm ohřívanou při počátečním proudu 600 A bez regulace. Pro vytvoření grafů, které by sloužily k určení vlivů ovlivňujících ohřev měděné tyče nemám dost dat. Mohu použít hodnoty získané při měření na ocelových a měděných tyčích a vytvořit graf pro porovnání vlivu na ohřev tyčí z různého materiálu.

7.3.1 Vliv okolního prostředí na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

Hodnoty získané při měření na ocelových, mosazných a měděných tyčích jsem použil k vytvoření grafu pro porovnání vlivu různých materiálů na ohřev tyčí. Pro sestavení grafu jsem použil data získaná při měření ohřevu na různých tyčích. Protože pro měděné tyče máme pouze jedno měření na tyči s průměrem 8 mm při počátečním proudu 600 A, musel jsem použít data z měření tyčí se stejnými parametry (počáteční proud a průměr).



Obrázek 7.9: Vliv materiálu tyče na spotřebovanou elektrickou energii při ohřevu na zvolenou teplotu

7.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Z naměřených hodnot lze odvodit určité zákonitosti. Pokud bych provedl více měření, za použití velkého množství různých parametrů (napájecí proud, délka, průměr atd.), mohl bych přesně matematicky určit zákonitosti pro minimalizaci měrného odběru elektrické energie ohřevu na zvolenou teplotu. Jelikož jsem provedl měření jenom na malém množství vzorků a získané hodnoty jsem neověřil kontrolními měřeními, mohu tuto závislost popsat jenom obecně.

Vliv velikosti napájecího proudu jsem si ověřil měřeními na ocelových a mosazných tyčích různých průměrů. Zjistil jsem, že zvyšováním napájecího proudu dochází ke snižování množství

odebrané energie potřebné na ohřev, zkracuje se doba ohřevu a zvyšuje se maximální dosažitelná teplota. U mosazných tyčí je tato závislost jasně patrná (Obrázek 7.6). U tyčí ocelových se tato závislost projevila u většiny vzorků (obrázek 7.2). Objevila se ovšem i jedna výjimka způsobená pravděpodobně chybným měřením.

Vliv regulace na množství spotřebované elektrické energie jsem testoval na ocelové tyči 8mm při třech hodnotách udržovaného proudu. Získané výsledky jsem porovnával s výsledky získaných při měření na tyči se stejnými parametry bez použití regulace. Při použití regulace došlo k nárůstu odebrané elektrické energie pro ohřev na zvolenou teplotu, zvýšila se maximální dosažená teplota a snížila se doba potřebná k ohřátí tyče.

Dále jsem testoval vliv průměru vsázky na odebranou elektrickou energii. Pro testování tohoto vlivu jsem zvolil ocelové tyče různých průměrů, ohřev byl prováděn při proudu 600A. U tohoto parametru jsem nedokázal určit jednoznačný vliv. U ocelových tyčí s klesjícím průměrem roste spotřeba, u tyčí mosazných se se zmenšujícím průměrem zmenšuje i spotřeba.

Následujícím testem jsem zjišťoval jakým způsobem ovlivní izolace potřebnou energii na ohřev. Měření jsem provedl na všech ocelových a mosazných tyčích. Podle výsledků, které jsem měřením získal je tento parametr ovlivněn velikostí požadované teploty. U většiny výsledků má izolovaná tyč do určité dosažené teploty větší spotřebu než tyč neizolovaná, nad touto teplotou má naopak izolovaná tyč menší spotřebu a neizolovaná větší. Stejně je to i s časem potřebným na ohřev. Zaizolování tyče vždy zvýšilo maximální dosahovanou teplotu.

Jako poslední jsem provedl kontrolu spotřeby ohřevu tyčí 8 mm z různých materiálů při napájecím proudu 600 A. Nejvyšší spotřebu měla tyč měděná, která dosáhla i nejnižší teploty. Nižší spotřebu měla tyč ocelová. Nejnižší spotřebu jsme změřili u tyče mosazné.

Kapitola 8

Závěr

Úkolem mé diplomové práce bylo řešit problematiku optimalizace přímého odporového ohřevu za pomoci zvolených parametrů. Optimalizací je v tomto případě myšleno zvýšení efektivity ohřevu, čímž vznikne úspora energie.

Za tímto účelem jsem se rozhodl provést experimentální měření z jehož pomocí lze odvodit všeobecná pravidla pro optimalizaci. Při návrhu tohoto experimentu jsem se rozhodl otestovat několik parametrů, které ovlivňují efektivitu přímého odporového ohřevu. Těmito parametry byly velikost napájecího proudu, vliv regulace, vliv izolace a fyzikální parametry vsázky. K provedení experimentálního měření jsem se rozhodl využít existující laboratorní model v kombinaci s osobním počítačem vybaveným měřicími kartami. Pro zaznamenání naměřených veličin jsem využil program Přímý odporový ohřev v.2. Výpočetní část programu jsem ovšem nevyužil. Pro provedení výpočtů jsem si předem vyrobil tabulky v programu Excel, do kterých jsem naměřená data vložil.

Z naměřených dat jsem zjistil, že pro přímý odporový ohřev na tomto modelu je nejlepším materiálem ocel. Mosazné tyče mají horší vlastnosti. Měděné tyče mají nevhodné vlastnosti, nízká efektivita ohřevu je způsobena vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí.

Díky získaným datům se mi podařilo zjistit jaký vliv obecně mají zvolené parametry na přímý odporový ohřev. Některé výsledky nejsou ovšem jednoznačné. Pro získání přesných výsledků je třeba provést více experimentálních měření, která budou pro kontrolu vícekrát opakována.

Během experimentálních měření jsem narazil na několik problémů, které by bylo dobré v budoucnosti řešit. Uchycení tyčí způsobuje velké ztráty odvodem tepla, což má za následek nerovnoměrnost ohřevu tyče. Mechanismus pro nastavování výšky uchycení tyče se špatně nastavuje a při vyšších teplotách dochází k deformování tyčí v důsledku teplotní roztažnosti. Současný způsob regulace je nespolehlivý, má velké pásmo necitlivosti, regulace není plynulá a dochází k výpadkům řízení v důsledku vybavení pojistek chránících řídicí obvod.

Literatura

- [1] HERING, M.: *Podstawy elektrotermii, cz.I.* Warszawa: Wydawnictwo naukowo - techniczne, 1998. ISBN 83-204-1384-2.
- [2] HRADÍLEK, Z.: *Elektrické teplo.* Ostrava: VŠB, 1989. ISBN 80-7078-006-1.
- [3] HRADÍLEK, Z.; a kol.: *Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy.* Ostrava: VŠB, 2001. ISBN 80-7078-874-7.
- [4] KREIDL, M.: *Měření teploty - senzory a měřicí obvody.* Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [5] NOVÁK, P.: *Elektrický ohřev I. část Odporový ohřev.* Košice: Mercury - Smékal, 2002. ISBN 80-89061-60-5.
- [6] RADA, J.; a kol.: *Elektrotepelná technika.* Praha: SNTL, 1986.
- [7] Manuál k modulu MU1221 [online]. [citováno 2012-2-12].
Dostupné na WWW: <http://www.tedia.cz/download/files/mu1221.pdf>
- [8] Manuál ke kartě PCA7228a [online]. [citováno 2012-2-12].
Dostupné na WWW: <http://www.tedia.cz/download/files/pca7228a.pdf>
- [9] Manuál ke kartě PCI1052 [online]. [citováno 2012-2-12].
Dostupné na WWW: <http://www.tedia.cz/download/files/pci1052.pdf>
- [10] ThermoCAM E45 příručka uživatele [online]. [citováno 2012-2-12].
Dostupné na WWW: <http://www.flirthermography.com>
- [11] Elektrický odporový ohřev [online]. [citováno 2012-3-2].
Dostupné na WWW:
webs.zcu.cz/fel/kee/et/www/OdporohrevmatodKoz.pdf

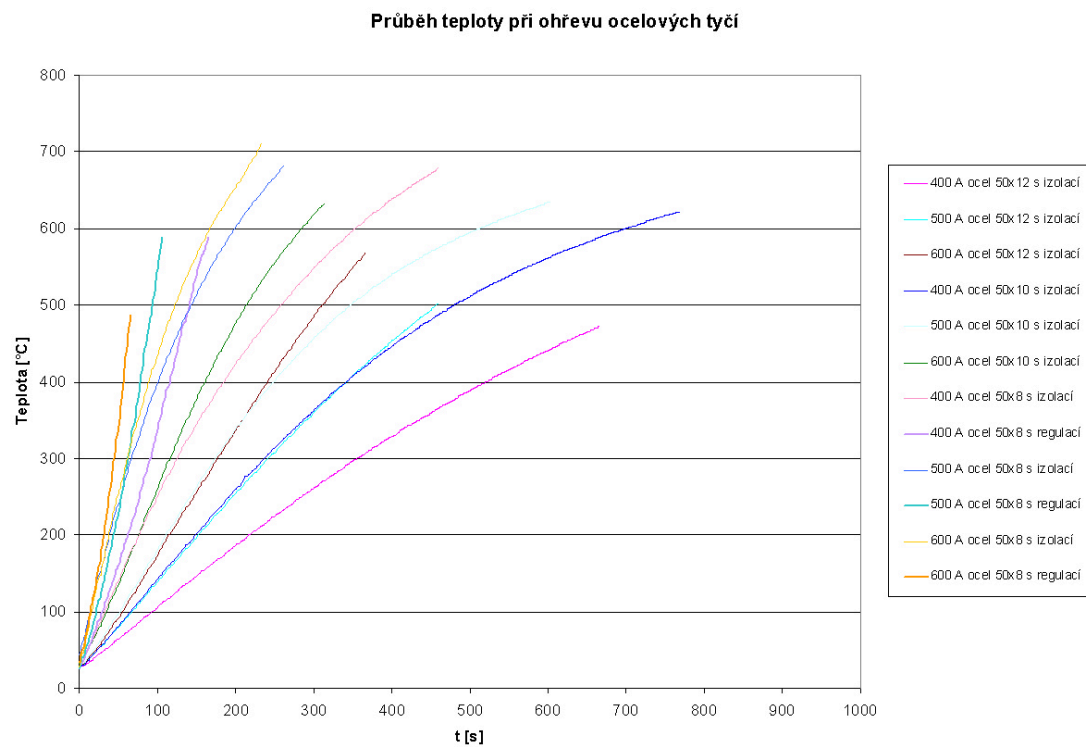
Seznam příloh

A Průběhy ohřevů tyčí

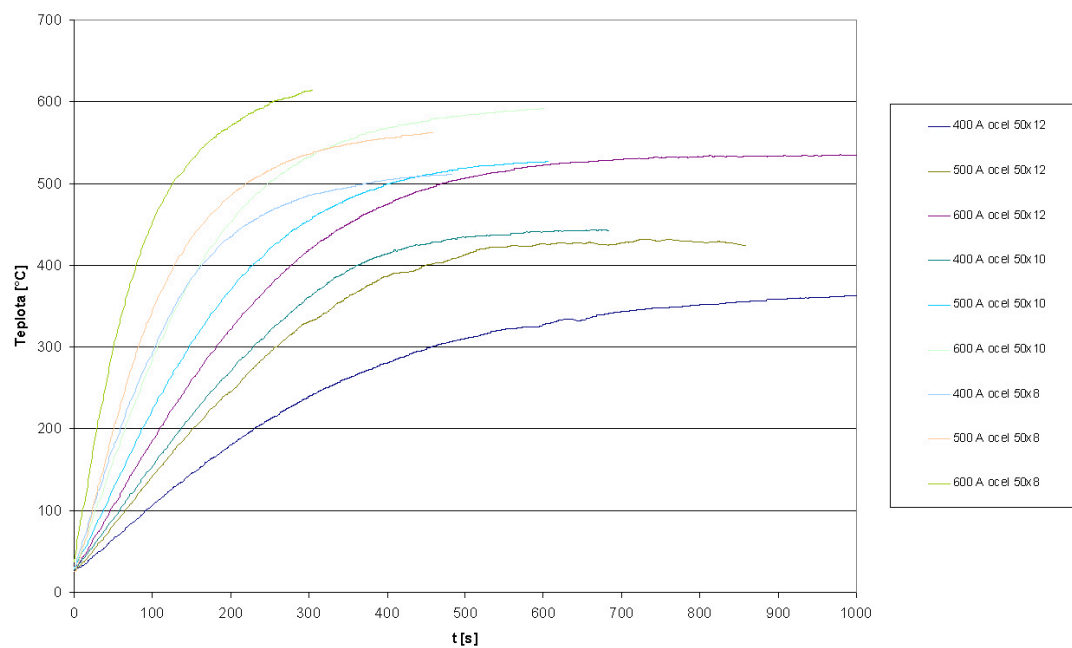
B Přílohy na CD

Příloha A

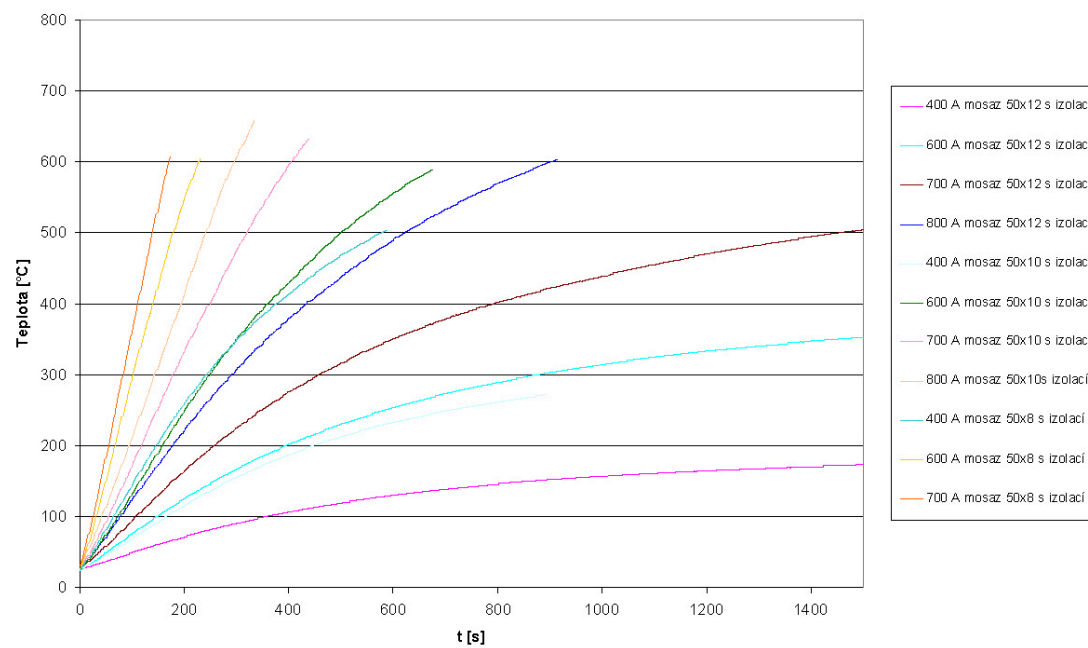
Průběhy ohřevů tyčí



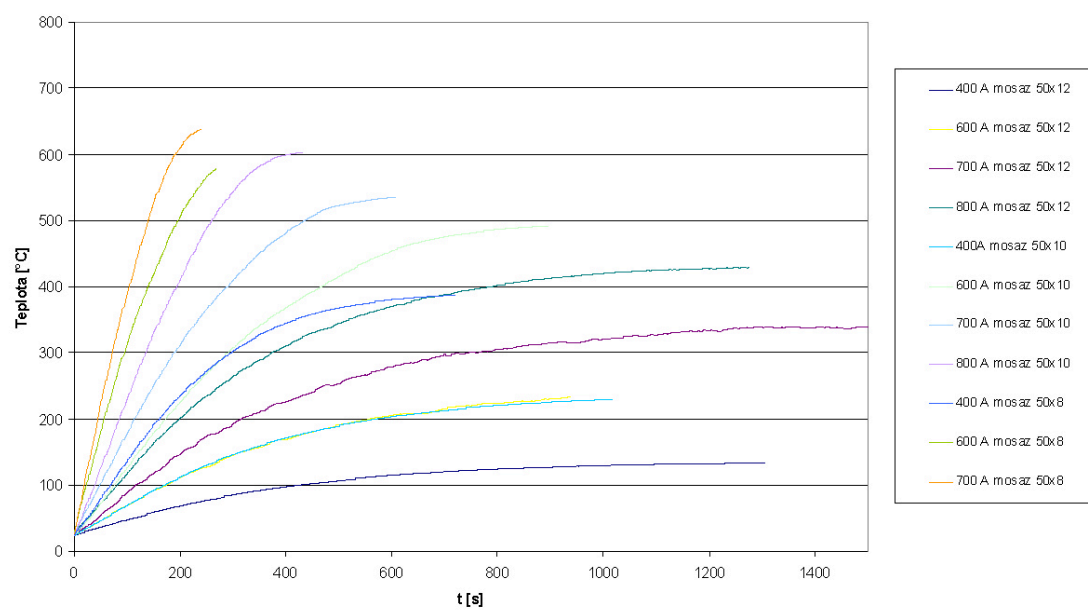
Průběh teploty při ohřevu ocelových tyčí



Průběh teploty při ohřevu mosazných tyčí



Průběh teploty při ohřevu mosazných tyčí



Příloha B

Přílohy na CD

Obsah

Struktura složek	Popis:
/	CD v příloze
— Zpracovaná data	Data zpracovaná do tabulek a grafů pomocí programu Excel
— Ocel	Ocelové tyče
— 8 mm	11 souborů .xls
— 10 mm	6 souborů .xls
— 12 mm	6 souborů .xls
— Mosaz	Mosazné tyče
— 8 mm	7 souborů .xls
— 10 mm	8 souborů .xls
— 12 mm	8 souborů .xls
— Měď	Měděné tyče
— 8 mm	1 soubor .xls
— Naměřená data	Původní data získané z programu Přímý odporový ohřev v.2
— Ocel	Ocelové tyče
— 8 mm	13 souborů .txt
— 10 mm	5 souborů .txt
— 12 mm	6 souborů .txt
— Mosaz	Mosazné tyče
— 8 mm	6 souborů .txt
— 10 mm	8 souborů .txt
— 12 mm	8 souborů .txt
— Měď	Měděné tyče
— 8 mm	1 soubor .txt